



Universidade de
2017

Departamento de Engenharia Civil

José Fernando
Figueiredo Pereira

DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES DE
REABILITAÇÃO DE PAREDES EM ADOBE



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2017

**José Fernando
Figueiredo Pereira**

DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO DE PAREDES EM ADOBE

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil realizada sob a orientação científica do Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor Aníbal Guimarães Costa, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

o júri

Presidente

Prof. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professor auxiliar, Universidade de Aveiro

Doutora Maria Helena da Costa Paiva
Bolsista de pós-doutoramento, CICECO, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira
Professor associado com agregação – Universidade de Aveiro

agradecimentos

A realização desta dissertação foi apenas possível com o apoio de várias pessoas ao longo do último ano.

Em primeiro lugar deixo os meus agradecimentos ao Professor Victor Ferreira, pela fantástica orientação, disponibilidade e apoio. Ao professor Aníbal Costa pela sua coorientação e partilha de conhecimentos.

A engenheira Maria Figueiredo, ao Vítor Rodrigues e ao Jorge Fonseca por todo o apoio prestado no laboratório.

Aos engenheiros e amigos, Daniel Tavares e António Figueiredo, pelo apoio e amizade permanentes.

Aos meus amigos de longa data, Renato e Tiago, pelo companheirismo e apoio ao longo deste percurso.

Aos meus pais e irmã, foram sempre sinónimo de apoio, força e confiança, não só ao longo deste trajeto como ao longo de toda a minha vida.

palavras-chave

adobe, argamassas, grouts, capilaridade ascensional, reforço estrutural.

resumo

A construção em Terra está presente na Europa e em todo o mundo. Nos últimos anos em Portugal a prática de reabilitação tornou-se mais frequente. As paredes de alvenaria têm merecido algum destaque nos últimos anos na reabilitação, no entanto, os resultados obtidos são pouco visíveis. A construção em alvenaria resistente em adobe encontra-se sobretudo na região Centro em Portugal. Atualmente aproximadamente 25% das construções existentes na cidade são de adobe. Este número sobe para 40% se aplicado à região de Aveiro. O adobe foi aplicado em todo o tipo de construções, incluindo edifício de interesse cultural e patrimonial. A presente dissertação propõe soluções de reabilitação de paredes de adobe para problemas de cariz estrutural e de capilaridade ascensional, combinando caldas de injeção com argamassas de reabilitação e outras soluções de reforço. Na atividade experimental foram desenvolvidas argamassas e caldas de injeção com objetivo de reabilitar as paredes de adobe. Foram realizados ensaios piloto com muretes para o estudo de soluções para a capilaridade ascensional e de soluções de reforço estrutural.

Os resultados obtidos foram favoráveis tanto nas soluções estruturais como nas soluções de capilaridade ascensional. No que diz respeito a capilaridade ascensional as argamassas de reabilitação demonstraram boa aderência compatibilidade e eficácia no corte hídrico. Nos ensaios de reforço estrutural a calda de injeção aplicada contendo fibras demonstrou boa fluidez, aderência e compatibilidade com o adobe. As argamassas aplicadas na reabilitação estrutural demonstraram boa aderência e compatibilidade com o adobe, permitindo a recuperação das paredes.

keywords

adobe, rehabilitation mortars, grouts, ascending capillarity, structural reinforcement.

abstract

Earth construction is present in Europe and around the world. In recent years in Portugal the practice of rehabilitation has become more frequent. The old masonry walls have deserved some attention in the last years in the rehabilitation processes. The construction in resistant masonry in adobe is also located in the center region of Portugal. Currently approximately 25% of the existing buildings in the Aveiro city are made of adobe. This number rises to 40% if applied to the region of Aveiro. The adobe was applied in all type of constructions, including buildings of cultural and patrimonial interest. The present dissertation proposes rehabilitation solutions for adobe masonry for problems of structural reinforcement and ascending capillarity, combining injection grouts with specific rehabilitation mortars and other solutions. In the experimental activity mortars and grouts were developed aiming the rehabilitation of adobe walls. Adobe walls were used to carry out pilot tests, some related to the study of solutions for the ascending capillarity and others used in the study of structural reinforcement solutions.

The results obtained were favorable both in the structural reinforcement solutions and in the solutions for ascending capillarity. Regarding the ascending capillarity, the rehabilitation mortars showed good adhesion, compatibility and efficacy in the rising water cut. In the structural reinforcement tests, the applied injection grouts containing fibers showed good fluidity, adhesion and compatibility with the adobe. The mortars applied in the structural rehabilitation demonstrated good adhesion and compatibility with the adobe, allowing a good recovery of the adobe walls,

Índice Geral

1 - Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento.....	1
1.2 - Objetivos	2
2 - Construção em terra	4
2.1 - Introdução	4
2.2 - História.....	5
2.3 - Técnicas de construção em terra	8
2.4 - O adobe	10
2.4.1 - História do adobe	11
2.4.3 - O sistema construtivo com adobe	19
2.4.4 - Argamassas nas construções em adobe.....	26
2.4.5 - Patologias associadas ao adobe	28
3 - Argamassas e caldas de injeção para reabilitação	32
3.1 - Materiais Constituintes.....	32
3.1.1 - Agregados	32
3.1.2 - Ligantes	33
3.1.2.1 - Cal aérea e cal hidráulica	34
3.1.3 - Água de amassadura.....	38
3.1.3.1 - Nas argamassas	38
3.1.3.2 - Nas caldas de injeção	39
3.1.4 - Adjuvantes e outras adições	40
3.2 - Argamassas	44
3.2.1 - Argamassas na reabilitação	45
3.2.1.1 - Argamassas de assentamento	45
3.2.1.2 - Argamassas de refechamento de juntas.....	46
3.2.1. - Argamassas de reboco.....	48

3.2.2 - Propriedades das argamassas	49
3.3 - Caldas de injeção.....	51
3.3.1 - Definição	51
3.3.2 - Ligantes e aditivos nas caldas de injeção	52
3.3.3 - Características das caldas de injeção.....	53
3.3.4 - Aplicação de caldas de injeção.....	54
3.4.6 - Propriedades físicas e mecânicas das caldas de injeção.....	59
3.4.7 - Caldas de injeção na construção em terra	60
4 - Estudo de soluções de reabilitação de paredes em adobe	62
4.1 - Metodologia Experimental.....	62
4.1.1 - Caracterização do adobe.....	62
4.1.2 - Desenvolvimento e caracterização das argamassas de reabilitação	66
4.1.3 - Desenvolvimento e caracterização das caldas de injeção para reabilitação	70
4.1.4 - Ensaio piloto em paredes de adobe.....	73
4.1.4.1 - Ensaio do estudo de soluções para a ascensão capilar.....	74
4.1.4.2 - Ensaio do estudo de soluções para reforço estrutural.....	77
4.2 - Resultados e Discussão	86
4.2.1 - Soluções para a ascensão capilar.....	86
4.2.2 - Soluções para reforço de danos estruturais	94
5 - Conclusões	102
6. - Bibliografia	104

Índice de figuras

Figura 1 – Distribuição geográfica mundial da construção em Terra	4
Figura 2- Bazar de Srdjan, Iraque.....	5
Figura 3 - Cidade de Shibam, no Iémem	6
Figura 4 – Castelo de Paderne, Algarve, Portugal.....	7
Figura 5 - Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique.....	8
Figura 6 – Técnicas de construção de terra	9
Figura 7 – Construções em adobe: a) No Peru; b) Em Norfolk, Inglaterra.....	12
Figura 8 – Presença do adobe em Portugal.....	13
Figura 9 – Construções de adobe na região de Aveiro	13
Figura 10 – a) Produção de adobes com recurso a mesa; b) Produção de adobes com alavanca incorporada nos moldes	15
Figura 11 – Prensa automática CLU 3000, Suíça.....	16
Figura 12 – Método de Hans Stumpf	17
Figura 13 – Molde de madeira simples	19
Figura 14 – a) Construção de arco em adobe; b) Pilar de adobe; c) Parede de adobe....	20
Figura 15 -Casa rural e casa urbana.....	21
Figura 16 – Exemplo de edifício de Arte Nova.....	21
Figura 17 – a) Sistema construtivo tradicional; b) Sistema construtivo com anéis de viga	22
Figura 18 – a) Sistema lajes em betão armado; b) Sistema híbrido..	23
Figura 19 – Exemplo de piso térreo destinado originalmente a ventilação e a ocupações de cariz não habitacional	24
Figura 20 – Exemplos de fachadas de casas de adobe	25
Figura 21 – Evolução das argamassas no tempo	27
Figura 22 – Fissuração de paredes e destacamento de revestimentos	29
Figura 23 – Quadro síntese da classificação de agregados.....	33
Figura 24 – Esquema síntese dos grupos e subgrupos de ligantes	34
Figura 25 - Cal na construção.....	35
Figura 26 - Efeito do superplastificante	42
Figura 27 - Exemplo de junta de adobe	46
Figura 28 - Exemplo de injeção.....	51

Figura 29 - Desagregação e falha de alvenaria.....	55
Figura 30 - Exemplo de injeções mal sucedidas	55
Figura 31 - Mistura e preparação de calda de injeção	57
Figura 32 - Aplicação da calda de injeção.....	57
Figura 33 - a) Ferramentas utilizadas na b) Limpeza de adobes	63
Figura 34 - Cubos de adobe.....	63
Figura 35 - Ensaio de capilaridade nos cubos de adobe	64
Figura 36 - Ensaio de dissolução do adobe	66
Figura 37 - Granulometria das areias utilizadas como agregados	67
Figura 38 - Cone de marsh utilizado nos testes de fluidez	72
Figura 39 - Seringa utilizada no ensaio de facilidade de injeção	72
Figura 40 – Murete de 3 fiadas para o estudo de ascensão capilar.....	74
Figura 41 – Marcação do adobe	75
Figura 42 – Medição da altura de água no murete	75
Figura 43 – Abertura de roços (murete IV)	76
Figura 44 – Colocação de calços (murete IV)	76
Figura 45 – Aplicação da argamassa de reabilitação na junta.....	77
Figura 46 – Cura da argamassa.....	77
Figura 47 – Murete de 7 fiadas para ensaio piloto sobre o reforço estrutural	78
Figura 48 – Realização de murete estrutural	79
Figura 49 – Aplicação de reboco e recolha de amostras	79
Figura 50 – Modelo da viga e pórtico usado nos ensaios mecânicos	79
Figura 51 – Preparação dos muretes para a introdução dos sensores.....	80
Figura 52 – Esquema de montagem dos sensores a) “frente” b)” trás”.....	80
Figura 53 - Aplicação de camada de regularização	81
Figura 54 - Ensaio pronto a correr, “trás” do murete VII.....	81
Figura 55 - Fissuração e perda de secção no murete V	82
Figura 56 - Fissuração e perda de secção no murete VI.....	82
Figura 57 - Fissuração e perda de seção do murete VII	82
Figura 58 – Fenda selada (a esquerda) e fenda não selada (a direita)	83
Figura 59 – Introdução de água e ar comprimido nos muretes	84
Figura 60 – Injeção de calda nos muretes	84
Figura 61 – Reposição de seções.....	85

Figura 62 – a) Aplicação de rede nas faces laterais; b) Pregagem da rede; c) Aplicação da rede no topo	85
Figura 63 - Comparação de capilaridades das argamassas desenvolvidas	88
Figura 64 - Absorção de água pelo murete I ao longo do tempo.....	89
Figura 65 - Absorção de água pelo murete II ao longo do tempo (com argamassa de cal hidráulica NHL80/20).....	90
Figura 66 - Absorção de água ao longo do tempo pelo murete III tempo (com argamassa de cal hidráulica NHL80/20 0.5SP).....	90
Figura 67 - Comparação de absorção de água ao longo do tempo dos três muretes	91
Figura 68 - Variação de altura de água nos muretes ao longo do tempo; Tempo para saturação do adobe nos muretes (I a IV): primeira fiada (A); segunda fiada (B); terceira fiada (C).....	92
Figura 69 – Murete I ao fim de 7 dias	93
Figura 70 -Murete II ao fim de 7 dias.....	93
Figura 71 – Murete III ao fim de 7 dias.....	94
Figura 72 – Murete IV ao fim de 7 dias	94
Figura 73 - Relação força deslocamento nos ensaios do murete V	97
Figura 74 - Relação força – deslocamento no murete VI.....	97
Figura 75 - Relação força-deslocamento no murete VII	98
Figura 76 - Relação tensão-extensão no murete V antes e após a reabilitação	98
Figura 77 - Relação tensão-extensão no murete VI antes e após a reabilitação.....	99
Figura 78 - Relação tensão-extensão no murete VII antes e após a reabilitação.....	99
Figura 79 - Murete VII após o ensaio de rutura e um exemplo de fissura no adobe preenchida com calda de injeção	101

Índice de tabelas

Tabela 1 - Capilaridade ascensional – relação causa-efeito	30
Tabela 2 - Fissuração em paredes de adobe – relação causa-efeito.....	31
Tabela 3 - Misturas de agregados finos e grossos na argamassa.....	67
Tabela 4 - Adição de superplastificante às formulações de argamassa	69
Tabela 5 - Adição de fibras à argamassa	70
Tabela 6 - Formulações de caldas de injeção	71
Tabela 7 - Trabalhabilidade e compacidade em amostras de argamassas	86
Tabela 8 - Diminuição da quantidade de água com recurso a superplastificante.....	87
Tabela 9 - Trabalhabilidade com introdução de fibras	87
Tabela 10 - Densidade e resistência mecânica das fibras	87
Tabela 11 - Coeficiente de capilaridade e porosidade aberta	88
Tabela 12 - Módulos de elasticidade	89
Tabela 13 - Coeficiente de capilaridade retirados dos ensaios dos muretes I, II e III....	91
Tabela 14 - Fluidez das caldas de injeção desenvolvidas.....	95
Tabela 15 - Resistência mecânica, densidade e módulo de elasticidade das caldas com fibras	95
Tabela 16 - Características do adobe e das argamassas de reboco usadas na reconstituição dos muretes.....	96
Tabela 17 - Módulos de elasticidade ao longo dos ensaios em todos os muretes	100

1 - Introdução

1.1 - Enquadramento

Atualmente em toda a Europa e de modo crescente em Portugal, a reabilitação tornou-se uma atividade mais frequente, aplicável não só ao património urbano e arquitetónico tradicional, mas também ao parque edificado mais recente que, pela sua qualidade construtiva, sofre de deficiências e degradação [Azeiteiro, *et al* 2012].

Segundo alguns autores [Abrantes e Silva, 2007] as paredes de alvenaria têm merecido algum destaque nos últimos anos, ainda que reduzido, com resultados pouco visíveis ao nível do seu desempenho final. Segundo estes autores, os esforços realizados ao nível da legislação, da certificação de produtos, da investigação e da criação de ferramentas técnicas têm vindo a aumentar, mas os resultados ainda não são muito visíveis. No que diz respeito aos materiais de construção há sinais de interesse por novos produtos e sistemas. As alvenarias assistem a uma evolução lenta em termos de reabilitação, pontuada por alguns exemplos positivos, que não permitem esquecer as deficiências deste sistema construtivo com técnicas ultrapassadas e incapazes de responder às exigências atuais e futuras.

A fissuração e os fenómenos associados à mesma, como a humidade e envelhecimento, causam grande apreensão. No fenómeno da fissuração é necessário dar destaque a:

- Causas da fissuração de paredes e alvenaria;
- Fissuração dos revestimentos tradicionais;
- Prevenção da fissuração de origem térmica;

No campo da conservação e reabilitação de paredes de alvenaria é preciso considerar as seguintes estratégias:

- Estratégias tradicionais de reabilitação de patologias não estruturais;
- Estratégias para reabilitação de paredes de alvenaria fissuradas;
- Precauções na reabilitação de fissuras em "ponte";

Segundo P. Lourenço [Lourenço (2015)] quando se trata de estratégias de reabilitação tem de se considerar as várias técnicas de intervenção para reabilitar paredes de alvenaria:

- Caldas de Injeção;
- Reconstrução Local;

- Reforço exterior;
- Substituição de juntas;
- Substituição de juntas com recurso a armaduras;

As caldas de injeção (grouts) para reabilitação e o reforço de alvenarias tornaram-se uma prática corrente desde eventos como o terramoto Friuli (Itália 1976). Desde então as caldas de injeção são aplicadas extensivamente [Binda, L. *et al.* (1994)]. As caldas de injeção são uma técnica passiva quem tem por objetivo devolver a integridade à parede e edifício na qual é aplicada, de forma a melhorar a sua capacidade resistente. Além da reversibilidade, têm por base a escolha da argamassa ou calda a aplicar compatível com o existente [Luso e Lourenço, (2014)]. Atualmente existem algumas caldas de injeção no mercado, que por norma são pouco satisfatórias, que devido à grande heterogeneidade, sobretudo nas alvenarias de pedra, não são compatíveis com vários tipos de alvenaria.

Existem outras soluções como redes ou a pregagem que se qualificam como soluções mecânicas para reforçar ou promover a ligação entre elementos que pretendem ser colaborantes. Existem as pregagens que reforçam a alvenaria, enquanto material, as pregagens generalizadas e as pregagens transversais, bem como outras que promovem as ligações estruturais ou melhoram o comportamento geral da estrutura. O uso de rede de reforço envolvendo paredes de adobe é possível e é capaz de proporcionar força adicional à estrutura recuperando a rigidez inicial [Figueiredo, A. *et al* (2012) e Varum *et al* (2014)]].

1.2 - Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foca-se especificamente no estudo e desenvolvimento de soluções de reabilitação de paredes em adobe centrando-se na resolução, em alvenarias de adobe com argamassas tradicionais, de anomalias que surjam de danos estruturais ou da ascensão capilar ou ainda de fissurações provocadas por outras causas como as variações de temperatura ou por ciclos gelo-degelo. Procura-se desenvolver assim soluções baseadas em argamassas para o corte hídrico ou caldas de injeção e outras soluções combinadas para o reforço mecânico de paredes de adobe.

2 - Construção em terra

2.1 - Introdução

A construção à base de terra é amplamente utilizada em múltiplas regiões quentes ou temperadas (Fig. 1). Mesmo hoje estima-se que mais de um terço da população mundial vive em casas realizadas em terra, sendo que este número aumenta para mais de metade se falarmos apenas dos países em desenvolvimento [Avrami, E., *et al* (2008)].

A terra é o material de construção natural mais importante e encontra-se disponível em quase todas as zonas do planeta. A terra foi sempre o material de construção predominante em praticamente todos os climas quentes e temperados. Nas últimas décadas, os materiais de terra voltaram a atrair um interesse considerável e recuperaram relevo na construção, especialmente nos países em desenvolvimento e em áreas rurais, protegidas e com património arquitetónico. Normalmente é obtido diretamente do local de construção ao escavar as fundações. Nos países industrializados a exploração inconsequente de recursos e o capital centralizado combinam-se com a intensa produção de energia e contribuem para a poluição do meio ambiente. De forma a combater estes problemas estes países estão a apostar cada vez mais na terra como material de construção. Juntamente com as exigências de construção crescentes, a nível térmico e económico que proporcionam um clima interior otimizado, está-se a começar de perceber que a terra enquanto material de construção é superior aos materiais de construção industriais [Minke, G. (2006)].

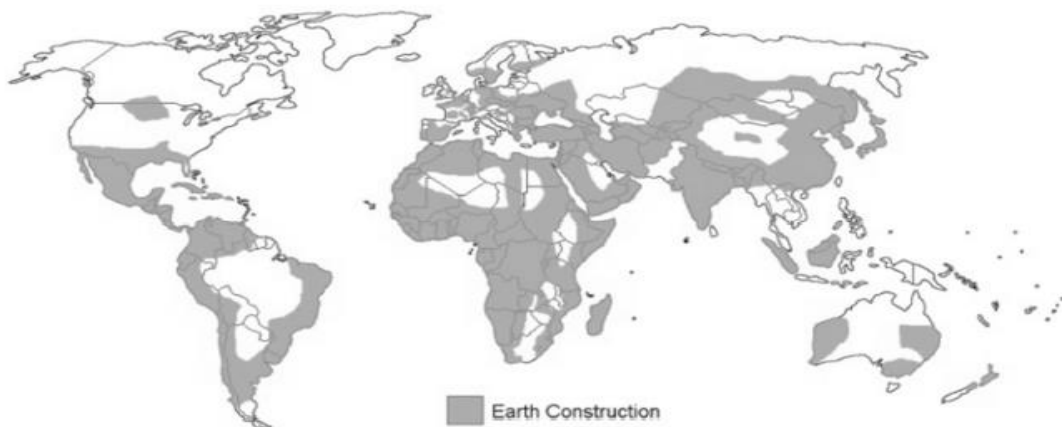


Figura 1 – Distribuição geográfica mundial da construção em Terra (adaptado de Silva (2013))

2.2 - História

As técnicas de construção com recurso a terra são conhecidas há cerca de 9000 anos. Foram descobertas casas de tijolos de adobe que datam de 8000 a 6000 A.C no Turquestão Ocidental, território este onde atualmente se encontram países como o Cazaquistão, Quirguistão, Tajiquistão, Turquemenistão e Uzbequistão [Pumpelly, R. (1908)]. Na bacia do rio Trigues, no Iraque, foram descobertos blocos de adobe que datam de 7500 A.C. Em Gizé, no Egito, há vestígios de blocos de terra fundida com 5000 anos. Arqueólogos ingleses encontraram técnicas de construção similares com 3000 anos de idade no Paquistão. Mesmo no Antigo Testamento é possível encontrar referências a estas construções com blocos de terra. [Berge (2009)].

A Grande Muralha da China, de 4000 anos de idade, foi originalmente construída recorrendo apenas a terra; posteriormente à obra inicial é que foram colocados tijolos e pedras que conferem a muralha a aparência de um muro de pedra. O núcleo da Pirâmide do Sol em Teotihuacan, no México, construído entre os 300 e 900 dC, consiste em cerca de 2 milhões de toneladas de terra compactada, sendo a construção em terra dominada por praticamente todas as culturas pré-colombianas. Em África, praticamente todas as mesquitas primitivas foram realizadas recorrendo a terra. Foram, inclusive, desenvolvidas técnicas de construção, há vários séculos, em que os edifícios eram cobertos com abóbadas de ladrilhos de barro ou cúpulas sem cofragem nem suporte durante a construção, sendo exemplo disso o bazar de Srdjan (fig. 2) no Iraque, que é coberto por tais cúpulas e abóbadas [Minke, G. (2006)].



Figura 2- Bazar de Srdjan, Iraque, (retirado www.anyonegirl.com 2017)

Jaquin [Jaquin (2008)], por sua vez, descreve a presença de indícios referentes à utilização de construção em terra na bacia do Mediterrâneo, pelos fenícios em 814 A.C e em 218 A.C; aquando da invasão ibérica, no Japão, o Templo de Horyuji possuía paredes de taipa construídas há cerca de 1300 anos e nos Himalaias foram encontradas construções em taipa com mais de 800 anos. A presença de construções em terra também visível na América central, no Peru no Novo México [Alexandra (2006)], e no Iémen existe a cidade histórica ainda hoje habitada, a cidade de Shibam (fig. 3) que teve origem no século III, embora os edifícios que hoje existem remontam ao século XVI [Helfritz, (1939)]



Figura 3 - Cidade de Shibam, no Iémen (retirado de <http://o-meu-passaporte.blogspot.pt> 2017)

No norte da Europa o exemplo mais antigo de construção em terra, paredes constituídas por tijolo de barro, encontra-se no forte de Heunenberg na Alemanha e remonta ao século VI AC. Descobertas da Idade do Bronze estabeleceram que na Alemanha a terra era usada como preenchimento em casas construídas em madeira ou para selar paredes feitas de troncos de árvores. Sabe-se ainda que existiam fortes construídos em terra em Espanha até o final do ano 100 A.C. No período medieval (séculos XIII a XVII), a terra era usada em toda a Europa Central como preenchimento em edifícios de madeira, bem como para cobrir telhados de palha e conferir aos mesmos alguma resistência ao fogo. Em França a técnica de construção em terra foi generalizada entre os séculos XV e XIX. Perto da cidade de Lyon, existem até aos dias de hoje vários edifícios em terra com mais de 300 anos que ainda se encontram habitados [Minke, G. (2006)].

A construção em terra floresceu na Europa Central desde do final do século XVIII e continuou até finais do século XIX. O método tornou-se particularmente popular em países como a Dinamarca, Inglaterra e Alemanha. Após a primeira e a segunda guerras mundiais as casas construídas em terra tornaram-se populares novamente; várias vilas e aldeias na Rússia foram destruídas pelas guerras e foram reconstruídas com recurso a terra e na Alemanha cerca 100 000 casas constituídas por terra sobreviveram a ambos os períodos de guerra [Berge (2009)].

Na Península Ibérica pensa-se que a construção em terra terá surgido por influência de vários povos como os Fenícios, Cartagineses, Romanos e Muçulmanos. A maior influência veio do povo muçulmano, foram estes que divulgaram mais a construção em terra. [Ribeiro (1969)]. Perduraram alguns exemplos de arquitetura militar islâmica em terra em Portugal, os Castelos de Paderne (fig. 4) e de Silves são dois desses exemplos.



Figura 4 – Castelo de Paderne, Algarve, Portugal, (retirado de Construções em Terra (2009))

A construção de terra em Portugal data de há vários séculos. No início do séc. XX assistiu-se ao decréscimo deste tipo de construção e ao favorecimento da construção em tijolo. No entanto, no fim deste mesmo século é visível o início de um movimento edificatório no Sul de Portugal caracterizado pelo retorno às técnicas ancestrais de construção. Atualmente são passíveis de observação em quase todo o país múltiplos edifícios antigos, que ilustram as diferentes técnicas de construção em terra (fig. 5) [Jalali, S. *et al* (2009)].

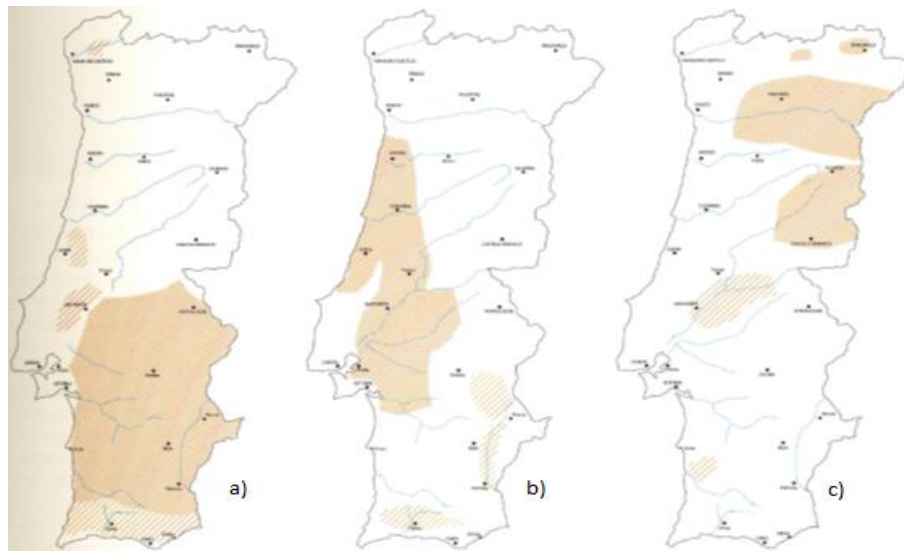


Figura 5 - Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique (adaptado de Construções em Terra (2009))

Existem registos de edifícios acima do Tejo com paredes de taipa em bolsas localizadas no Baixo Douro, na zona de Aveiro-Mira, no Vale do Tejo e na zona da raia junto a Castelo Branco [Pinho (2001)]. Já os edifícios de paredes feitas em adobe localizam-se numa faixa aproximadamente retangular que se estende de Sul para Norte e engloba alguns distritos: Setúbal, Évora, Portalegre, Santarém, Leiria, Coimbra e Aveiro [Carvalho, J. *et al* (2008)].

2.3 - Técnicas de construção em terra

A construção tradicional de terra implica a utilização do solo local disponível, o que originou a aplicação de diversas técnicas de construção de terra em todo o mundo, técnicas estas que apresentam múltiplas variações. Esta multiplicidade de técnicas construtivas e respetivas variações é consequência das variações observadas nas propriedades dos solos de região para região e de outros fatores, tais como: o clima, o tipo de materiais de construção disponíveis, a cultura da população e os respetivos recursos económicos da mesma. [Silva, R. (2013)]

Segundo Houben e Guillaud [Houben H; Guillaud H. (2008)], é possível simplificar as diferentes técnicas e respetivas variações em 18 técnicas (fig. 6). De acordo com os mesmos autores também é possível mostrar que o material de terra bruta pode assumir três funções de acordo com a técnica utilizada: monolítica, como alvenaria de

rolamentos e como material de enchimento a estruturas executadas com outros materiais.

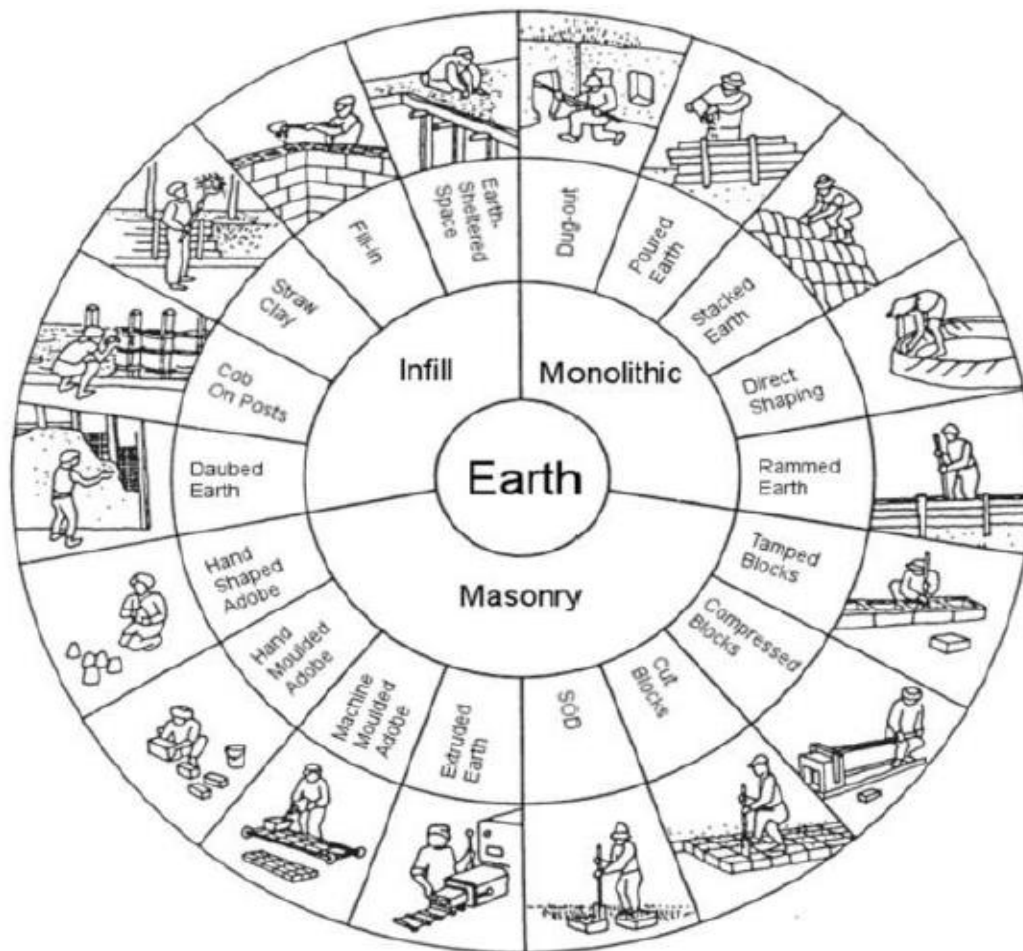


Figura 6 – Técnicas de construção de terra (retirado de Houben and Guillaud (2008))

A construção monolítica tem diversas formas de execução. Desde a taipa, a técnica mais conhecida em Portugal, que consiste na compactação de terra húmida numa cofragem de madeira, denominada de taipal. A terra vazada ou moldada é outro processo construtivo onde se aplica cofragens à semelhança da taipa, mas é aplicada sem compactação e com a terra mais plástica. “Cob”, ou terra empilhada, consiste basicamente no empilhamento de terra e adição de palha à mesma, sendo esta técnica aplicada maioritariamente nas paredes de cariz cultural. O processo mais atual, consiste em armar a terra com aço tal como é executado no betão, mas neste processo é utilizada uma cofragem perdida em madeira pelo interior e a terra é projetada pelo exterior sendo posteriormente a superfície regularizada.

A construção por unidades consiste na aplicação de vários tipos de unidades pré-fabricadas. Desde adobe, blocos de terra recortada, terra extrudida até a bolcos de terra compactados.

Na construção por enchimento e revestimento encontra-se o tabique, também apelidado de taipa, ou “Wattle and Doub”. A técnica consiste na colocação de terra, em estado plástico e/ou cal, sobre um suporte engradado de madeira cana ou vime [Jalali, S. *et al* (2009)].

Contudo as técnicas de construção de terra mais populares são: aplicação de tijolos de adobe, taipa e a “Wattle and Doub”, sendo todas estas técnicas tradicionais. No que toca a técnicas modernas o bloco de terra comprimida (BTC) (CEB - *compressed earth block*) é a mais popular [Silva, R. (2013)].

Como o objetivo desta dissertação passa pela reabilitação de paredes em adobe, nas secções seguintes será dado enfoque a este material, desde a sua história à sua aplicação, anomalias e reabilitação.

2.4 - O adobe

A aplicação de adobe é uma técnica de construção relativamente simples, tanto ao nível do fabrico como da edificação, talvez esta simplicidade justifique o facto de a maioria das construções em terra antigas terem sido realizadas com o mesmo. Muitas destas construções em adobe ainda são habitadas nos dias de hoje. O termo adobe deriva do árabe “attob” e significa tijolo seco ao sol [Rogers e Smalley, (1995)].

As construções da Adobe representam uma alta percentagem do património nacional, histórico, cultural e arquitetónico. As estruturas de adobe apresentam uma arquitetura singular com características geométricas muito atraentes, incorporando materiais de origem natural. Contudo, o comportamento destas estruturas em adobe é deficiente nos que diz respeito à aplicação de cargas horizontais, como as provocadas por um terramoto, o que põe em perigo sua integridade estrutural, cultural e histórica. Se este tipo de estruturas não for devidamente reforçado poderá apresentar uma resposta deficiente às ações sísmicas devido as propriedades da alvenaria de adobe: massa grande, baixa resistência à tração, comportamento frágil e amaciamento e perda de resistência à saturação. Sob as ações horizontais, estas estruturas podem sofrer graves

danos estruturais e, por vezes, colapso, causando inúmeras perdas humanas e patrimoniais [Figueiredo, A. *et al* (2012)].

2.4.1 - História do adobe

O uso de terra como material de construção foi iniciado, a nível mundial, na antiguidade. Os tijolos de barro secos ao sol aparecem pela primeira vez em torno de 10.000 A.C [Morton, T. (2010)], enquanto a evidência da produção mais antiga de adobes moldados remonta ao século VI A.C na Mesopotâmia [Morton, T. (2010) e Wright, G. (1985)].

As descobertas arqueológicas da era neolítica testemunham a existência de edifícios de barro e o uso de tijolos de adobe, moldados à mão, em particular em torno do mar Mediterrâneo, do Médio Oriente, do Mar Egeu, da Sírio-Palestina, da Anatólia, da Índia e da China, [Houben e Guillaud, (1994); Philokyprou, (2015) e Morton, T. (2010)].

As primeiras composições dos tijolos eram normalmente realizadas com lama, por vezes era adicionada palha ou excrementos de animais, no entanto gesso, cal e betume encontravam-se disponíveis para as primeiras civilizações. Os egípcios foram os primeiros a desenvolver arcos e abóbadas, dado que, não existia madeira na região [Morton, T. (2010)]. De facto, a realização de abóbadas e cúpulas em terra, sem recurso a suportes, era utilizada por várias culturas. Durante séculos os indianos Pueblo de Taos (Novo México) construíram as suas casas em adobe recorrendo ao solo, água e fibras existentes na região. O centro histórico da cidade de Shibam, no Iémen, com uma área de cerca de 20,000 m² foi construído exclusivamente em adobe. [Minke, G. (2006)].

Na Europa o uso de alvenaria de terra foi difundido historicamente. Com a forte influência proveniente de África a palavra “otobb” foi transformada em adobe, nome pelo qual a alvenaria de terra é hoje conhecido em todo o Mundo (fig. 7). Esta designação foi transportada para as Américas, embora a alvenaria de terra, nas Américas, tenha influência cultural europeia pré-datada. Um padrão semelhante foi desenvolvido em outros países colonizados, como Austrália e Nova Zelândia, onde as tradições europeias, transportadas por colonos, se misturaram com tradições indígenas sob a influência dos recursos locais e do clima [Morton, (2010)].

Segundo Mateus, o uso de terra para a construção é mencionado em vários manuais portugueses de construção militar e civil e de agricultura, sobretudo a partir do século XVII [Mateus, J. (2002)]. Em Portugal a construção em terra, como elemento estrutural, encontra-se maioritariamente no sul e centro litoral. No Norte e no centro interior a construção em pedra é predominante. A taipa é a técnica construtiva mais aplicada no Sul do país [Varum, H. *et al* (2006)].



Figura 7 – Construções em adobe: a) No Peru; b) Em Norfolk, Inglaterra. (adaptado de Morton (2010))

O adobe aparece sobretudo nas bacias hidrográficas do Mondego e Vouga (fig. 8), sendo aqui que se verifica o maior número de construções onde é aplicado este material/técnica construtiva. O adobe também está presente na bacia hidrográfica do rio Tejo, bacia esta que inclui o estuário do rio Sado. Em suma, o adobe aparece sobretudo em zonas costeiras e junto às margens dos rios, onde as rochas estão em decomposição avançada, sendo que os solos predominantes têm origem em depósitos fluviais, mas também existem solos ácidos de mineralização lenta e solos argilosos. No entanto pode-se afirmar que a existência do adobe numa certa região está mais dependente da quantidade de água disponível do que propriamente do tipo de solo existente. A cultura do adobe, material e construtiva, foi sobretudo marcante na região da Beira Litoral (Bacia do Vouga e Bacia do Mondego) [Tavares, A.; Fernandes, M. (2016)]. “O rio Mondego estabelece a linha de fronteira entre as duas regiões onde os dois métodos eram aplicados: o adobe prevalece a norte e a taipa a sul.” [Costa, A. *et al* (2007)].

A construção em alvenaria resistente em adobe encontra-se sobretudo na região de Aveiro. Este tipo de construção com recurso ao adobe apareceu e cresceu no final do

séc. XIX, tendo alcançado o auge na primeira metade do séc. XX. A partir dos anos sessenta a técnica começou a cair no desuso até desaparecer como técnica construtiva. Atualmente aproximadamente 25% das construções existentes na cidade são de adobe. Este número sobe para 40% se aplicado à região de Aveiro. O adobe foi aplicado em várias construções, desde edifícios rurais, edifícios de maior porte, muros, poços de água, igrejas e armazéns (fig. 9). Deve-se ainda destacar o elevado número de edifícios de enorme valor patrimonial e histórico que foram realizados em adobe, podendo servir de exemplo alguns edifícios de Arte Nova [Varum, H. *et al* (2006)].



Figura 8 – Presença do adobe em Portugal (retirado de “O Adobe” (2016))



*Figura 9 – Construções de adobe na região de Aveiro (adaptado de Costa, A. *et al* (2007))*

Normalmente os blocos de adobe eram realizados recorrendo a terra arenosa húmida, que posteriormente a ser amassada e colocada em formas, ficava a secar ao sol. De maneira a melhorar o desempenho mecânico do adobe, era frequente o recurso a cal e, em algumas situações, a palha [Varum, H. *et al* (2008)].

No que diz respeito ao território nacional pode-se dividir o adobe em dois grupos:

- Adobes de terra: A sua realização era feita com recurso a terra argilosa, à qual eram adicionadas frequentemente fibras vegetais. A adição de fibras tinha como objetivo controlar a retração das argilas, mas além disso conferia maior resistência e menor peso aos adobes produzidos;
- Adobos de cal: eram realizados com terra arenosa à qual se adicionava cal. A adição de cal tinha como objetivo colmatar a inexistência de argila na terra arenosa; [Tavares, A.; Fernandes, M. (2016)]

Nesta região, entre a Bacia do Mondego e Bacia do Vouga, a produção e a construção eram processos separados, sendo que, existiam modelos de adobes pré-definidos com dimensões fixas e diferentes designações que dependiam da aplicação dos mesmos em obra:

- Mendões, 0.45x0.15x0.12, para paredes interiores de habitações;
- $\frac{3}{4}$, para remates de aparelhos de alvenaria;
- Muro de parede, 0.45x0.30x0.12, para paredes exteriores de habitações;
- Muro de poço, com forma ligeiramente curva, para adaptar as paredes à geometria do poço;
- Muro de estanca rio, para poços de maior dimensão, o que significava que a curvatura lateral do molde era inferior; [Tavares, A.; Fernandes, M. (2016)]

2.4.2 - A produção de adobe

O método mais simples e tradicional de produzir adobe é através do enchimento de moldes com solo argiloso misturado com água e (ou não) com fibras. Diferentes tipos de moldes podem ser utilizados, sendo que estes por norma são feitos de madeira. Esta técnica é normalmente aplicada em países em desenvolvimento. Areias argilosas são misturadas com água e posteriormente é adicionada palha, na maioria dos casos, de seguida esta mistura é colocada (“atirada”) nos moldes. Quanto maior for a força

aplicada na colocação da mistura no molde melhor é a compactação. Por fim, a superfície superior do molde é regularizada à mão ou com recurso a peças de madeira [Minke, G. (2006)].

Uma pessoa pode produzir cerca de 300 blocos por dia, incluindo a preparação da mistura, transporte e empilhamento. Na Índia, uma pessoa pode produzir até 500 blocos por dia recorrendo a moldes duplos dimensionados para um tijolo menor. Para facilitar o trabalho, os tijolos podem ser moldados sobre uma mesa. Outro método bastante acessível passa pela utilização de moldes com alças de 80 cm de comprimento, o que permite aos trabalhadores fabricarem os tijolos em pé (fig. 10) [Minke, G. (2006)].



Figura 10 – a) Produção de adobes com recurso a mesa; b) Produção de adobes com alavanca incorporada nos moldes (retirado de Minke, G. (2006))

De acordo com Arellano [Arellano, J. (2011)] foi por volta do século XII que a manufatura e construção em adobe são expostas em termos construtivos, através de textos escritos em árabe.

As primeiras técnicas de produção de adobes na Europa aparecem no século XVIII em França. Em 1789 o arquiteto francês François Cointreaux desenvolveu uma prensa de blocos de adobe, operada manualmente, tendo desde então várias prensas sido idealizadas. Prensas operadas manualmente conseguem produzir pressão entre os 5 e os 25 cm² e requerem entre três a cinco pessoas para um funcionamento ótimo. No entanto a produção de adobes diária utilizando este tipo de prensas anda entre os 150 e os 200 adobes, número inferior em relação ao método primitivo. A vantagem destas prensas mecanizadas, no entanto, é que podem ser utilizadas misturas com menor teor de água,

o que torna possível o empilhamento dos blocos imediatamente após a produção [Minke, G. (2006)].

No entanto, os blocos produzidos com este método são geralmente estabilizados com teores de cimento entre os 4% e os 8%, para lhes conferir resistência suficiente. Isto é necessário devido à ausência de água suficiente ou de um impacto dinâmico adequado, capaz de ativar significativamente as forças de ligação dos minerais de argila. Sem cimento, os blocos prensados geralmente têm uma resistência à compressão mais baixa que os dos adobes produzidos recorrendo ao método tradicional. Além da adição de cimento, a mistura a utilizar tem de ser mantida com níveis de humidade e composição constantes. Se a composição sofrer variações o volume do material a ser preenchido e a pressão mudam. Isso origina variações na altura e na capacidade resistente dos blocos produzidos.

Prensas totalmente automatizadas, podem produzir 1500 a 4000 blocos diariamente (fig. 11). No entanto, estas exigem investimentos avultados e a sua manutenção pode ser difícil, sobretudo em países em desenvolvimento. Para assegurar consistências uniformes, por norma, estas máquinas devem ter os trituradores e misturadores separados. Estas prensas são apenas económicas se: tiverem longevidade, forem amplamente utilizadas e se existir matéria prima em quantidades suficientes. Se assim não for os custos de manutenção e reparação mitigam qualquer potencial económico [Minke, G. (2006)].

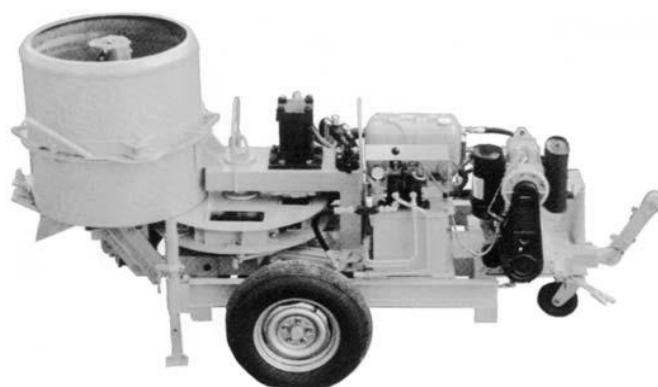


Figura 11 – Prensa automática CLU 3000, Suíça (Retirado de Minke (2006))

O método de produção desenvolvido nos EUA por Hans Stumpf (fig. 12) e patenteado em 1946, um aparelho de fabricação de blocos, parece mais eficiente comparativamente

ao anterior. Neste a mistura a empregar é preparada numa betoneira e posteriormente é vertida num funil de grandes dimensões, que se desloca sobre uma grelha de moldes. Os moldes são então preenchidos e as suas faces são suavizadas mecanicamente. De seguida, a grelha de moldes é levantada recorrendo a uma alavanca, deixando os blocos separados a secar no chão. Após um período de secagem preliminar, os blocos devem ser rodados, de forma a ser garantida uma secagem uniforme [Minke, G. (2006)].

Segundo Houben e Guillaud [Houben, H.; Guillaud, H. (1989)] existem quatro tipos de produção de adobes:

- Moldagem simples: Este método permite a produção diária de 500 adobes com quatro ou cinco trabalhadores;
- Moldagem sistematizada: permite a produção de 2500 unidades de adobe com uma equipa de trabalho com quatro ou cinco trabalhadores;
- Semi-mecanizada: 10 000 unidades produzidas diariamente com uma equipa de seis trabalhadores;
- Mecanizada: 20 000 unidades de adobe num só dia, com uma equipa de seis trabalhadores;



Figura 12 – Método de Hans Stumpf (retirado de Minke, G. (2006))

Apesar da multiplicidade de materiais e técnicas construtivas existentes, existem dois requisitos mínimos transversais a todos os materiais e técnicas a serem cumpridos:

- O teor de argila tem de estar entre os 15 e 18%, em volume; [Doat, P. (1985)]

- A proporção de água, em volume, tem de ser 1 para cinco, isto é, 1m³ de água para 5m³ de terra; [Aedo, W. (2011)]

A falta de pedra em Aveiro e o elevado custo na sua aquisição possibilitaram o desenvolvimento de outras técnicas na região, como é o caso do adobe. Foi a escassez de pedra que levou à demolição de algum edificado em pedra, assim como da muralha que cintava parte da cidade, para a construção de obras de interesse público. O número de fabricantes de adobes cresceu de forma significativa, sobretudo, nos últimos anos da década de 20. Em Esgueira a sua produção ocupava um número elevado de pessoas, cerca de 500, segundo dados de “O Anuario Commercial de Portugal”, sendo que esta era uma zona de referência na produção de adobes na região. As areias da região eram muito apreciadas, por serem consideradas boas para traçar com a cal no fabrico de argamassas. Para além de Esgueira, também eram produzidos adobes na freguesia do Eirol e em Aveiro, no lugar da Presa. [Rodrigues, M. (1998)].

Dado que os adobes utilizados no estudo prático desta dissertação são da zona de Aveiro, Gafanha da Nazaré, e sabendo-se que os mesmos foram produzidos manualmente recorrendo apenas a moldes, irá desenvolver-se o estudo da produção de adobes realizados com moldes.

Segundo Tavares e Fernandes [Tavares, A.; Fernandes, M. (2016)] em Portugal podem ser identificados quatro tipos de adobe moldado.

- Adobe de terra, é produzido com terra e água e adiciona-se areia posteriormente para corrigir;
- Adobe de palhão, realizado com terra e fibra vegetal seca e cortada. A fibra vegetal pode ser junco, palha ou outro;
- Adobe de lodo ou de gramão, é manufaturado com terra que contém fibras vegetais, tais como, raízes;
- Adobe de cal, é produzido com terra e cal, a extinção do ligante era realizada diretamente com a terra e com a água;

Os moldes são maioritariamente realizados em madeira (fig. 13) e em alguns casos são colocadas chapas metálicas nas faces interiores dos moldes. A colocação destas chapas metálicas nas faces interiores do molde tem como finalidade facilitar a remoção do molde sem danificar o adobe produzido. [Tavares, A.; Fernandes, M. (2016)]



Figura 13 – Molde de madeira simples (adaptado de mapio.net, (2017))

O ciclo de produção e construção no adobe engloba todas as seguintes fases:

- Extração de terra;
- Preparação de terra;
- Adição de estabilizador;
- Mistura da terra com água;
- Manufatura manual ou moldagem;
- Secagem;
- Acondicionamento/ armazenamento;
- Construção;

2.4.3 - O sistema construtivo com adobe

Um edifício de adobe pode ser caracterizado acima de tudo pela utilização de materiais naturais na sua construção. Terra e cal natural são empregues na realização dos adobes e rebocos, por sua vez a madeira é utilizada na construção de pisos e cobertura [Tavares, A. *et al* (2012) a]

O adobe pode ser utilizado em paredes, tetos e até coberturas. Devido a esta particularidade a designação “adobe”, a nível global, refere-se tanto ao material como ao sistema construtivo em simultâneo. A utilização do adobe também é possível, com as devidas adaptações, na construção de pilares, colunas e até mesmo em arcos e abóbadas. Em Portugal o adobe foi apenas utilizado na realização de paredes, pilares e arcos (fig.14). É de salientar que a construção de paredes com adobe requer a construção em

alvenaria recorrendo a aparelhos diferenciados quase sempre de complexa utilização [Tavares, A.; Fernandes, M. (2016)].

Um sistema construtivo é constituído por diferentes elementos, elementos esses que desempenham funções específicas, de forma a garantirem o bom desempenho global do sistema [Tavares, A.; Fernandes, M. (2016)].

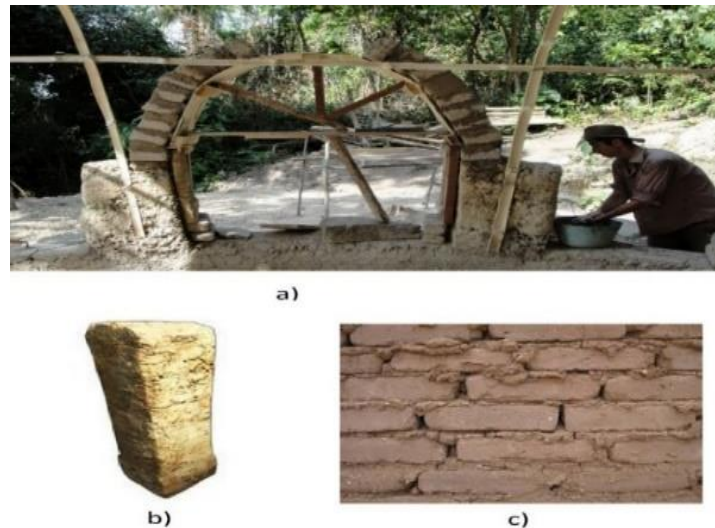


Figura 14 – a) Construção de arco em adobe (reservanaturalvictoria.blogspot.pt, (2017)); b) Pilar de adobe (ark.gamepedia.com, (2017)); c) Paredes de adobe (pinterest.pt,(2017))

O sistema construtivo tradicional de adobe consiste em:

- Fundações diretas;
- Paredes exteriores;
- Paredes interiores;
- Cobertura e piso;

A região de Aveiro possui um elevado número de edifícios em adobe, isto deve-se à abundância e fácil acesso aos materiais necessários para a realização deste tipo de construção. O tipo de habitação mais comum nas zonas rurais desta região é a casa de piso térreo, esta normalmente está voltada a sul de forma a maximizar os ganhos solares, os anexos e as dependências agrícolas também se encontravam alinhadas e viradas a sul. A sua estrutura é normalmente retangular. Nas zonas urbanas existe maior incidência para as casas de 2 pisos (fig.15) [Varum, H. *et al* (2008)].



a) Casa rural



b) Casa em meio urbano

Figura 15 -Casa rural e casa urbana (Retirado de Varum et al (2005))

Em Portugal, na região de Aveiro, o sistema tradicional de construção em adobe começou a sofrer alterações no início do século XX. Estas alterações foram impulsionadas por influências exteriores, consequentes da imigração, mas também devido à industrialização na região, indústrias dos cimentos e tijolo cerâmico e ao aparecimento e introdução do sistema porticado de betão armado [Tavares *et al* (2011)].

As influências exteriores fizeram-se sentir na arquitetura de edifícios novos em adobe e na organização dos espaços interiores, período Arte Nova (fig.16) observado entre 1910 e 1920. Já o aparecimento dos novos materiais refletiu-se na alteração do sistema construtivo, pela introdução dos novos materiais em intervenções de reabilitação e em construção nova, surgindo a partir de 1930 [Tavares *et al* (2012) a)].



Figura 16 – Exemplo de edifício de Arte Nova (retirado de Tavares et al., (2011))

As modificações no sistema construtivo em adobe foram realizadas em crescendo. Inicialmente foram introduzidos o anel de viga em betão armado e a platibanda, normalmente em adobe, tijolo ou pedaços cerâmicos (fig. 17). Por sua vez as paredes interiores em tabique foram substituídas por paredes em tijolo de três furos, e a espessura das paredes de adobe (exteriores) foi reduzida [Tavares *et al.*, (2012) b)].

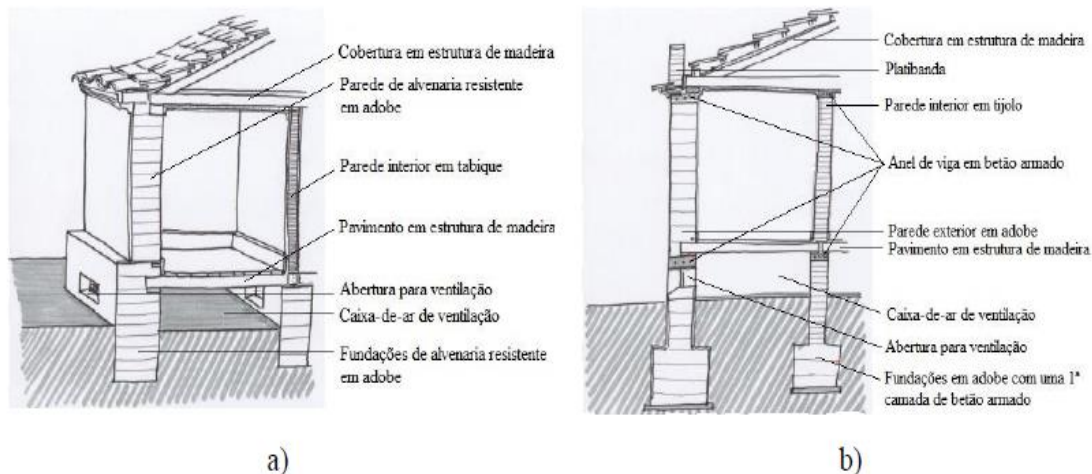


Figura 17 – a) Sistema construtivo tradicional; b) Sistema construtivo com anéis de viga (adaptado de Tavares *et al.*, (2012) b))

Posteriormente ocorreu a introdução de elementos estruturais em betão armado, tais como: pilares, vigas e lajes (áreas de serviço, varandas e terraços). A cavidade que incorpora o sistema de ventilação é mantida, no entanto no piso térreo é aplicada uma camada de argamassa de betão normalmente revestida com material cerâmico. Neste período também se observa o reforço dos cunhais e o decréscimo nem sempre de paredes divisórias em tijolo nos andares superiores (fig. 18). Já entre 1940 e 1950 surgem edifícios munidos de sistema híbrido, resultante de projetos de extensões. Neste sistema o adobe é aplicado na ampliação nos espaços existentes ao nível do piso térreo, sobre estas paredes em adobe são executadas lajes em betão armado e as paredes passam a ser construídas com recurso tijolo cerâmico [Tavares *et al.* (2012) b)].

Para a presente dissertação interessa sobretudo analisar o sistema construtivo tradicional. O tema da mesma centra-se na reabilitação do adobe pelo que interessa estudar o sistema de construção tradicional.

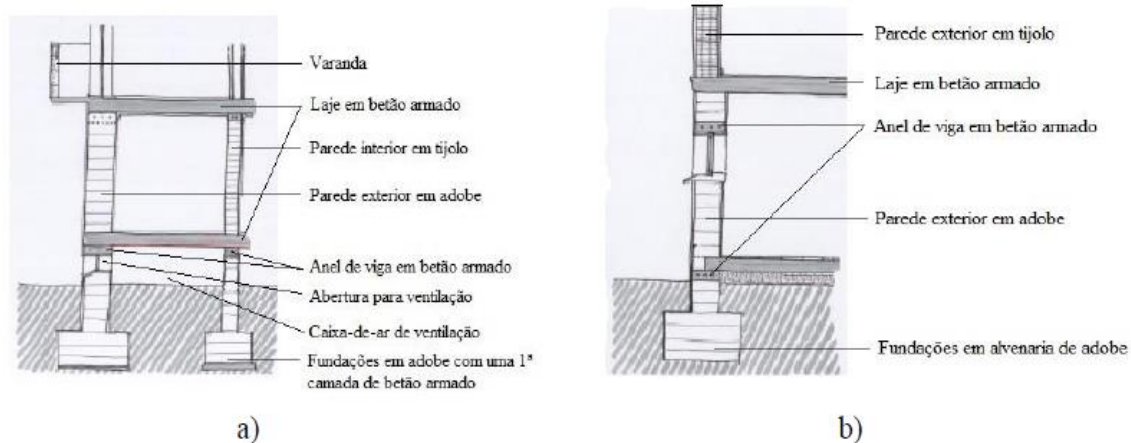


Figura 18 – a) Sistema lajes em betão armado; b) Sistema híbrido. (adaptado de Tavares et al., (2012) b)).

A realização de **fundações** requer a abertura prévia de roços no terreno, estes devem ser executados no alinhamento de todas as paredes, interiores e exteriores, que existam no rés-do-chão. Os muros de fundação realizados para as paredes exteriores têm maior profundidade e espessura quando comparados com os muros de fundação das paredes interiores, este podem ser construídos recorrendo a pedra, adobe ou tijolo maciço. Frequentemente a espessura dos muros de fundação ultrapassa em 0.10m a espessura das paredes que suporta, esta espessura pode ainda aumentar se as vigas de madeira do piso não forem encastradas. A profundidade dos muros de fundação depende das cargas a que cada parede vai resistir (interior e exterior) do tipo de fundação e do número de pisos a ser realizados, no entanto, para paredes exteriores a profundidade está entre os 0.50 e os 0.80 metros e para paredes interiores ronda os 0.50 (0.40-0.60 m) [Tavares, A.; Fernandes, M. (2016)]. Em alguns casos assiste-se à realização de uma camada, prévia ao assentamento do muro de fundação, de argamassa misturada com telhas ou tijolos partidos, ou até mesmo a aplicação de uma argamassa de cimento pobre de forma a evitar o contacto direto do muro de fundação em adobe com o solo. A aplicação desta “camada” tinha por objetivo evitar a humidade ascensional sendo criada uma barreira impermeabilizante. Os muros de fundação realizados em adobe são construídos a “uma vez”, isto é, os blocos estão dispostos com o maior comprimento no sentido transversal [Tavares, A.; Fernandes, M. (2016)].

Deve-se ainda destacar a solução muito corrente, utilizada na ventilação nas construções em adobe. Consiste na utilização de caves ou pisos térreos de altura muito reduzida ou

caixas-de-ar com aberturas para o exterior, que permitam a ventilação do piso (estrutura em madeira) e da base das paredes [Tavares, A. *et al* (2011)]. Em alguns edifícios este espaço dedicado a ventilação surge como espaço reduzido do pé direito com alturas entre os 1.80 e os 2.20m (fig. 19). Era utilizado para arrecadação de produtos agrícolas, adega entre outras funções de cariz não habitacional e permitia que a área de habitar ficasse numa posição mais vantajosa e menos suscetível ao efeito da humidade ascensional. [Tavares, A. *et al* (2014) a)]



*Figura 19 – Exemplo de piso térreo destinado originalmente a ventilação e a ocupações de cariz não habitacional (adaptado de Tavares, A. *et al* (2011)).*

As paredes exteriores (fig. 20) são resistentes e podem ser, em alguns casos, de alvenaria de pedra não aparelhada ou mais frequentemente de adobe. A alvenaria de adobe pode ser realizada com diferentes espessuras. Esta variação de espessura ocorre em função da geometria dos blocos, e consequentemente em função da geometria dos moldes, mas deve-se sobretudo ao modo como estes são dispostos, à meia vez ou a uma vez nas paredes divisórias e a uma vez e meia ou duas vezes no caso das paredes exteriores. Quando executadas com adobe as suas espessuras variam entre 0,30m e 0,80m dependendo do número de pisos, altura do pé-direito e possíveis elementos construtivos que possa ter. No nível do embasamento a espessura da parede ronda os 0.50-0.65m até cerca de 50cm acima da cota do solo. De uma forma generalista apresentam espessuras na casa dos 0,40m ao nível do piso térreo, que diminui nos pisos superiores e eventualmente também pode ser menor em espaços relacionados a janelas, sendo que, nesta situação é utilizada muitas vezes de alvenaria de tijolo entre o

parapeito e o pavimento [Tavares, A. *et al* (2011), Tavares, A.; Fernandes, M. (2016) e Rodrigues (2007)]

Tem baixa resistência à tração, em relação à compressão apresentam níveis razoáveis de resistência e tem níveis de resistência menor ao corte. Com a evolução do tempo a espessura das paredes foi sendo reduzida o que as tornou mais suscetíveis a esforços horizontais e proporcionou maior risco de instabilidade e encurvadura. [Tavares, A. *et al* (2011)].



Figura 20 – Exemplos de fachadas de casas de adobe (researchgate.net 2017)

As **paredes interiores** são normalmente realizadas em tabique ou de tijolo com espessuras entre os 0,10m e os 0,15m, mas também podem ser de adobe para obras de maiores dimensões. As paredes interiores de tabique podem ter um papel estrutural importante dado que contribuem para uma reserva de resistência. Esta contribuição deve-se ao comportamento elástico que estas têm, que contrabalança com o comportamento rígido das paredes. No entanto por norma as paredes de tabique estão estruturalmente desligadas das paredes de adobe [Tavares, A. *et al* (2011) e Tavares, A. *et al* (2014) b)].

A **estrutura de piso** na generalidade é realizada com madeira, é composta por barrotes (vigas de madeira), que estão apoiadas nas paredes resistentes, e pelo soalho (Posteriormente iriam passar a estar apoiados numa cinta de betão armado). As vigas são aplicadas no sentido de menor distância entre os apoios, distância essa que podia ser igual a largura de todo o edifício (dos 6.50 aos 8.0m). Para vãos superiores a 5 metros são aplicadas vigas de 8x22cm ou de 10x20cm, no caso de os vãos serem inferiores a 5 metros existem vigas de 8x16cm e 10x18cm e se o vão for superior a 11 metros é

possível manter a secção, de vão superiores a metros, mas aplica-se um reforço com um elemento metálico ou realiza-se uma emenda a meio vão sobre uma parede interior. As vigas são colocadas paralelamente a uma distância que varia entre os 0.20 e os 0.50m. O soalho é colocado sobre as vigas, as placas de madeira (são maiores em edifícios antigos) são pregadas e rematadas através de um rodapé no contacto com as paredes exteriores. [Tavares, A. *et al* (2014) b); Tavares, A.; Fernandes, M. (2016); Tavares, A. *et al* (2011) e Tavares *et al.*, (2012) b)].

A estrutura da **cobertura** é realizada em madeira. As soluções estruturais adotadas para a cobertura irão ter em conta a função do edifício e o tipo de utilização que se deseje dar ao desvão do telhado, utilização esta que normalmente se prende com fins habitacionais. Os três tipos de estrutura portantes mais aplicados em estruturas de cobertura são: sistema de madres, asnas *Palladio* e asnas com duas linhas e sem escoras no plano

O sistema de madres era o mais utilizado. Era o que exigia menos requisitos ao nível da carpintaria e da aplicação. No entanto este sistema restringe mais o vão para o apoio as vigas(3.5-4m) e exigia que as paredes de adobe ou de tabique reforçado se prolongassem até a cota da cobertura o que limitava bastante a configuração do espaço. Devido a estes dois fatores e ao crescimento das serrações este sistema foi sendo substituído pelo sistema de asnas. As asnas *Palladio* eram um sistema relativamente comum, eram aplicáveis a vãos entre os 6.5 e os 8 metros. Já as asnas com duas linhas e sem escoras no plano possuíam uma ligação metálica na zona dos topos da linha para amarração às paredes de adobe [Tavares, A.; Fernandes, M. (2016); Tavares, A. *et al* (2011) e Tavares, A. *et al* (2014) c)]

2.4.4 - Argamassas nas construções em adobe

As primeiras argamassas, de que há conhecimento, foram descobertas na localidade de Yftah'el na Galileia (Israel) e têm mais de 10 000 anos. Em Jericó e na Turquia, 8000 a 7000 a C., regista-se a presença de cal e gesso em construções.

A adição de pozolanas á argamassa de cal foi introduzida pela mão dos romanos. Estas ao reagirem com o hidróxido de cálcio formam silicatos de cálcio, que devido à sua estabilidade, asseguram maior resistência mecânica e redução da porosidade da argamassa.

Já entre o século XVIII e o século XIX, Vicat (dando seguimento ao trabalho de Smeaton e Collet-Descotils) desenvolve a primeira cal hidráulica. Tais cals possuíam propriedades permitiam realizar a presa debaixo de água. [Alvarez *et al* (2005) e Coutinho, A. (1997) a)]. Em 1825, Aspdin concretiza o seu primeiro cimento Portland em Wakefield, Inglaterra. Em 1853, em França, Emile Dupon e Charles Demarle, criam um cimento hidráulico artificial análogo ao inglês. [Alvarez, J. *et al* (2005)].

Em Portugal a partir do início do século XIX o cimento Portland passa a ser o ligante preferencial em detrimento da cal hidráulica e da cal hidratada. O cimento Portland apresenta vantagens, tais como: tempo de presa reduzido; facilidade de manuseamento, preparação e armazenagem no estaleiro; comportamento mecânico melhorado e rapidez na construção. No entanto, também apresenta desvantagens como a maior suscetibilidade à fendilhação e elevada rigidez para sistemas tradicionais. Estas começam a ser significativas em edifícios antigos, nos quais apresenta um comportamento pouco satisfatório [Alvarez *et al* (2005), Lanas (2004) e Callebaut (2001)]. A figura 21 sintetiza a evolução das argamassas no tempo.

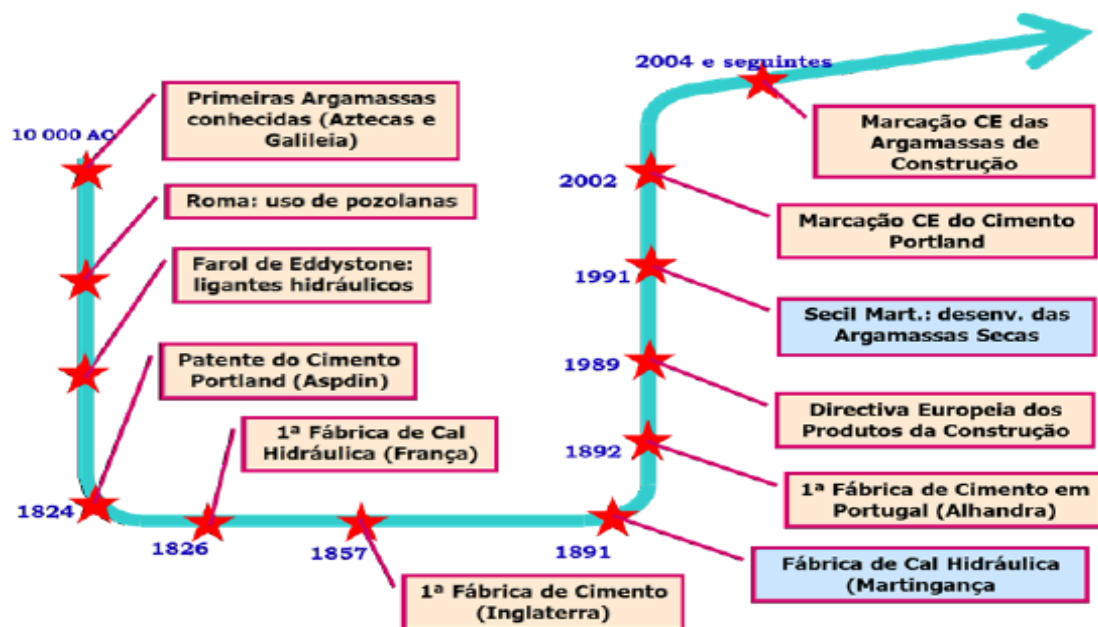


Figura 21 – Evolução das argamassas no tempo (retirado de Duarte, C. (2009))

No que diz respeito às construções em adobe as argamassas de assentamento são realizadas com o mesmo material que o adobe é executado pelo que são extremamente

compatíveis. O reboco e as argamassas de assentamento, aplicadas na zona de Aveiro, possuem diferentes traços sendo os mais comuns o 1:3 e o 1:4, relação em volume, de 1 de cal para 3 ou 4 de areia. A cal, que é usada como ligante, é bastante aplicada na região de Aveiro. As argamassas de revestimento são normalmente de cal e areia, sendo de ressaltar que em algumas situações a cal aplicada é hidráulica. A aplicação de cal hidráulica aparece principalmente nas fundações e zona do embasamento [Ruano, A. *et al* (2010); Tavares, A. *et al* (2011), Tavares e Fernandes (2016)].

O reboco era realizado *in situ* era aplicado por norma em três etapas, etapas essas que consistiam em camadas que iam diminuindo de granulometria até chegarem ao acabamento final. A aplicação do reboco desta forma permite a secagem de uma camada para a outra, o que possibilita a secagem e o ajuste ao suporte e consequentemente maior controlo sobre a retração e a fendilhação, entre camadas. Por norma a última camada é de estuque com argamassas de gesso e cal e o acabamento final das paredes é normalmente realizado através da caiação a branco e com pigmentos ou corantes para obter outras cores. [Ruano, A (2009); Rede Azul (2005) e Velosa, A. *et al* (2014)].

2.4.5 - Patologias associadas ao adobe

De acordo com Varum *et al* [Varum, H. *et al* (2005)] em construções realizadas com o adobe a patologias mais relevantes advém, maioritariamente, da presença de água e de deficiente comportamento das fundações. Esta tem ação direta ou indireta em praticamente todas as outras causas que levam a patologias no adobe. As causas sistemáticas para existência de anomalias no adobe são: presença de água; ocorrência de assentamentos; movimentos das fundações; travamentos deficientes das paredes; existência de cargas concentradas; deformação excessiva dos elementos estruturais; esforços elevados transmitidos por elementos externos; solicitações induzidas por sismos; comportamento distintos de materiais diferentes; utilização de revestimentos muito espessos e desadequados; envelhecimento e degradação dos materiais; ventilação insuficiente (no interior dos edifícios); deficiente funcionamento das coberturas; erros/deficiências construtivas; ação da temperatura.

[Varum, H. *et al* (2005)] A sintetização de causas e patologias correntes, ou mais comuns, pode permitir o apoio a projetos de reabilitação, ao encontrar soluções e correções de tratamento adequadas a patologia e ao material. Como tal é necessário

identificar as patologias mais comuns: fissuração da alvenaria de adobe e dos seus revestimentos; esmagamento localizado; fissuras nos vãos das aberturas; deformação excessiva; empolamento e destacamento dos revestimentos; fissuração na junção de paredes, por exemplo na ligação dos cunhais; presença de manchas e humidades; ocorrência de eflorescências; degradação do próprio adobe; degradação dos revestimentos.

Segundo Tavares *et al* [Tavares, A. *et al* (2012) b)] as patologias estruturais estão normalmente relacionadas com três fatores: afundamento da Fundação; ausência de coesão estrutural atribuível à falta de ancoragem adequada entre paredes e entre paredes e pisos ou revestimentos e danos transmitidos às paredes pela estrutura de madeira da cobertura.

Por sua vez, segundo o mesmo autor, as patologias mais frequentes associadas ao efeito da água /humidade nestes sistemas de construção são: efeito de água na estrutura adobe; efeito da água na cobertura de paredes e revestimentos de tinta. A figura 22 ilustra alguns dos efeitos sofridos.



Figura 22 – Fissuração de paredes e destacamento de revestimentos (adaptado de Varum et al (2005))

A presente dissertação pretende apresentar soluções para a fissuração de paredes em adobe bem como para a minimização da ascensão capilar. Como tal, irá ser dado mais destaque às patologias e as causas em torno dos mesmos.

A fissuração ou fendilhação pode ocorrer em zonas correntes, mas normalmente ocorre nos pontos mais frágeis das paredes (vãos de portas, janelas, ligação de paredes

ortogonais e locais de fendas anteriores). A fissuração pode ser de origem estrutural ou não, com influência na segurança, sendo a fissuração diagonal (deve-se a assentamentos da fundação) um claro exemplo disso mesmo. A correção de fissuras deve ser realizada o mais rápido possível, dado que, a fissuração torna-se um ponto entrada de água no interior da parede e a segurança do edifício encontra-se em causa.

O fenómeno da humidade ascensional ocorre quando a humidade oriunda do solo, dado que as paredes não estão munidas de barreiras estanque e impermeáveis, migra para fiadas e juntas de argamassas superiores da parede. A água que está a migrar por capilaridade vai dissolver os sais solúveis da alvenaria, das argamassas e do solo. As condições de temperatura e humidade relativa irão provocar a sua evaporação, com a respetiva deposição e cristalização dos sais, provocando eflorescências, se a cristalização se der na superfície da parede, ou criptoflorescências, se a cristalização se der entre o reboco e a alvenaria. A cristalização de sais origina desagregações, empolamentos do reboco e a degradação da alvenaria [Tavares, A. *et al* (2014) b); Pinho, F. (2000) e Appleton, J. (2011)].

Nas tabelas 1 e 2 enumeram-se algumas patologias e causas de relevância para a dissertação [Tavares, A. e Fernandes, M. (2016)].

Tabela 1 - Capilaridade ascensional – relação causa-efeito

Capilaridade ascensional (causa/efeito)		
Elemento construtivo	Causa	Efeito no edifício
Paredes portantes de adobe	Excessivo humedecimento da parede por ação da água ou humidade ascensional,	Destacamento de reboco e perda de material de partes dos blocos de adobe
	Humidades ascensionais por falta de corte hídrico ou sua presença abaixo da cota do piso exterior decorrente de alterações das cotas de pavimento interior	Manchas ou eflorescências na base da parede
		Perda de coesão do revestimento das paredes com eventual desagregação do reboco e degradação da pintura

Tabela 2 - Fissuração em paredes de adobe – relação causa-efeito

Fissuração (causa/efeito)		
Elemento construtivo	Causa	Efeito no edifício
Fundações	Assentamento do terreno por obras nas imediações	
		Abertura de fendas ou fissuras em paredes
	Assentamento do terreno por problemas de drenagem de águas	
	Inexistência de fundação ou fundação com reduzida profundidade	Fissuração em várias paredes do edifício
Paredes portantes de adobe		Fendas com orientação dependente da área de parede afetada
	Movimento para fora do plano de paredes, rotação das paredes associada a problemas nas fundações ou por fraca ligação entre a parede e a restante estrutura de pisos e cobertura. Impulsos horizontais dados às paredes por incorreto funcionamento da estrutura da cobertura. Diferencial de comportamento mecânico entre as paredes com fraca ligação e com espessuras diferentes	Fendas com orientação vertical na separação entre paredes de fachada e paredes interiores
		Fendilhação vertical na zona do cunhal ou entre a fachada principal e a parede de empena

3 - Argamassas e caldas de injeção para reabilitação

3.1 - Materiais Constituintes

3.1.1 - Agregados

A EN998-1 classifica o agregado (fig. 23) como material granular que é constituído por a mistura de múltiplas partículas, partículas estas que possuem uma grande variedade de tamanhos, que constituem o esqueleto da argamassa e não intervém no processo de cura, ou endurecimento, da argamassa [CEN (2010) b)]. Os agregados constituem cerca de 70 a 80% do volume do material, pelo que, se percebe que a qualidade dos mesmos assume um papel preponderante nas propriedades dos materiais de ligação. A areia é o elemento que aparece em maior quantidade na constituição dos agregados, consequentemente, a qualidade da areia presente no agregado influencia consideravelmente a argamassa que daí irá resultar. A qualidade de uma areia está dependente sobretudo dos seguintes fatores: forma das partículas e a existência de impurezas e do tamanho médio das partículas assim como da sua distribuição granulométrica [Hewlett, P. (2001)].

Um aspeto importante relativamente aos agregados é a distribuição do tamanho das suas partículas. Através da combinação de vários tipos de agregados é possível obter uma curva otimizada de tamanho de partículas, melhorando a distribuição dos grãos e do preenchimento dos vazios. Os agregados que possuem uma distribuição de partículas contínua permitem gerar argamassas com menores quantidades de material cimentício, o que reduz a quantidade de água necessária a mistura, e consequentemente diminui os problemas relativos à fissuração e à retração. [Melo, K.; Carneiro, A. (2010)]

No que diz respeito à classificação granulométrica, os inertes que não passam no peneiro com malha de 5 mm são considerados grossos, apelidados de godo se a sua origem for sedimentar, rolado ou brita se for partido de forma artificial. Os inertes com dimensões abaixo dos 5 mm são considerados areia, rolada se for natural e de origem sedimentar, britada se for artificial, ou reciclada [Hewlett, P. (2001), Veiga, M. (2003) e Coutinho, A. (1997) a)].

Quanto a forma os agregados naturais são constituídos por partículas arredondadas e lisas e os agregados de moagem de rochas são angulosos. Os agregados de moagem produzem argamassas com melhor acomodamento entre partículas, o que se traduz logo em menor porosidade e maior resistência mecânica. A capacidade de retenção de água e

consequentemente a trabalhabilidade são igualmente beneficiadas. Por fim os agregados podem ainda ser classificados segundo a sua massa volúmica (fig. 23), sendo classificados de: leves, médios e pesados [Veiga, M. (1998) e (2003)]

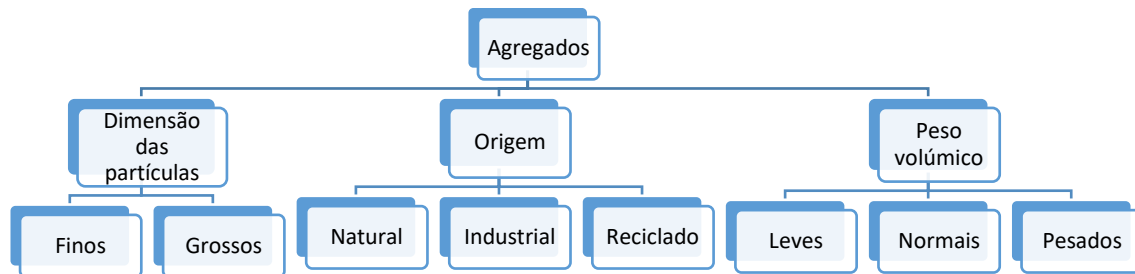


Figura 23 – Quadro síntese da classificação de agregados

Os inertes mais utilizados a nível nacional são por norma areias de origem natural. Estas areias são extraídas de areeiros e dos leitos dos rios, podem ser de origem siliciosa, calcária ou argilosa. No que diz respeito a granulometria estas areias possuem granulometria que varia dos 5 milímetros até as dezenas de micrómetros [Veiga, M (1998)].

3.1.2 - Ligantes

Os ligantes destacam-se pela capacidade de aderir e aglomerar elevadas proporções de inertes, o que confere resistência e coesão ao conjunto tornando-o capaz de ser aplicado como argamassa. Existem múltiplos tipos de ligantes que são passíveis de utilização em argamassas, como por exemplo, o cimento, a cal aérea, a cal hidráulica, o gesso e resinas de origem orgânica (aplicadas em situações específicas) [Coutinho, A. (1997) a) e Hewlett, P. (2001)]

“Os ligantes mais correntes em argamassas são os cimentos e as cais. Entre estas existem as cais aéreas e as cais com propriedades hidráulicas.” [Faria, P. (2012)].

De acordo com o Warren e Moropoulou [Warren, J.; Moropoulou. A. (2000) (2003) (2005)] A divisão das argamassas segundo o tipo de ligante das mesmas em grupos e subgrupos distintos é sem duvida a mais consensual entre a maioria dos autores. As argamassas podem ser realizadas com os seguintes tipos de ligantes: cal, gesso ou

cimento (fig. 24). Os diferentes ligantes vão atribuir diferentes propriedades a argamassa final. Dentro do grupo da cal existem dois subgrupos: a cal aérea e a cal hidráulica. No subgrupo da cal hidráulica podem-se considerar diferentes tipos de hidráulicidade, dependendo da substância que é adicionada (fig. 24). Pode-se destacar as seguintes adições:

- Substâncias pozolânicas naturais;
- Pós e fragmentos de tijolo e outros cerâmicos;
- Calcinação de pedra calcária com alguma percentagem de argila;

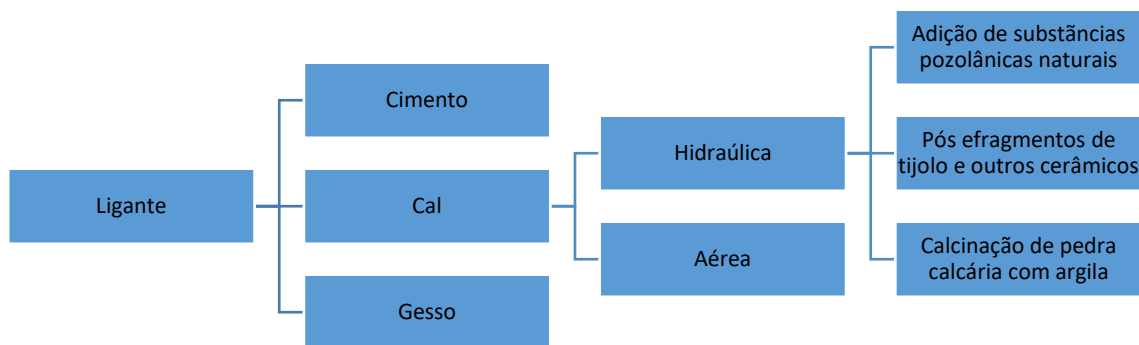


Figura 24 – Esquema síntese dos grupos e subgrupos de ligantes

Existem ainda as argamassas bastardas, nestas argamassas o ligante assume dois constituintes o cimento e a cal aérea. As características obtidas neste tipo de argamassas são uma média entre as características referentes a cada um dos ligantes separados, isto é, se cada um deles fosse o único ligante. As argamassas de cais hidráulicas podem originar argamassas idênticas às bastardas de cimento e cal aérea sem ser necessário recorrer a introdução do cimento. Contudo, e sobretudo as cais hidráulicas naturais, não devem libertar sais solúveis e devem ser compatíveis com vários tipos de suporte [Faria (2012)].

3.1.2.1 - Cal aérea e cal hidráulica

De acordo com a NP EN 459-1 de 2002 a cal é definida como um material que abrange qualquer forma física e química, sob o qual pode surgir óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e hidróxidos de cálcio (Ca(OH)_2) e magnésio (Mg(OH)_2). Ainda de

acordo com a norma existem vários tipos de cal aplicados na construção (fig. 25) dos quais se destacam a cal aérea e a cal hidráulica [(CEN) (2010) c].

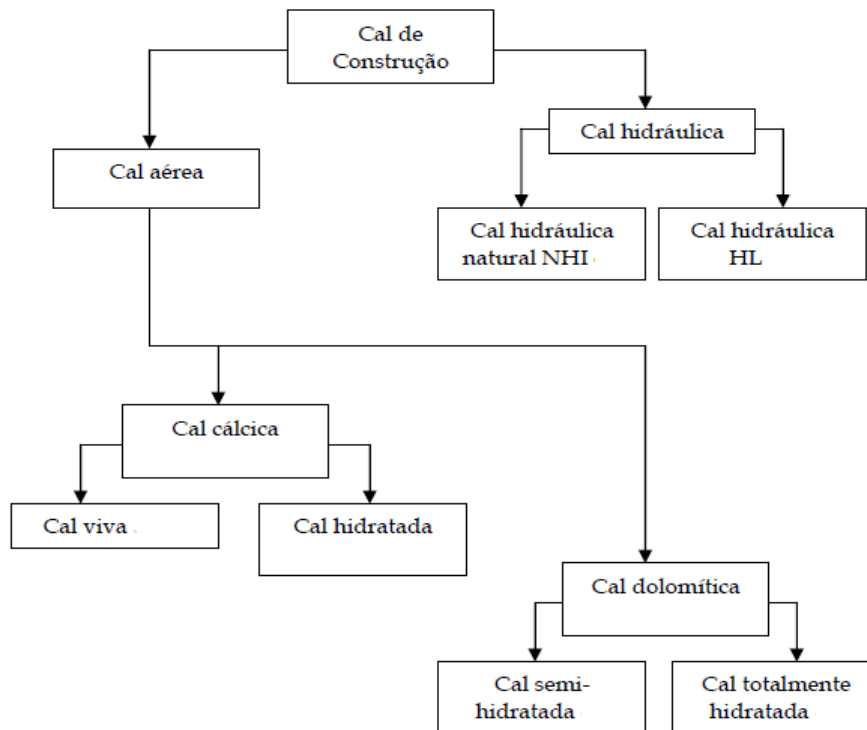


Figura 25 - Cal na construção (adaptado de Coelho, A. et al (2009))

A realização prática desta dissertação inclui a aplicação tanto de cal aérea como de cal hidráulica. No que diz respeito a cal aérea foi utilizada cal hidratada e em relação a cal hidráulica foi aplicada cal hidráulica natural (NHL). Pelo que de seguida se irá aprofundar os conceitos de cal aérea, cal aérea viva, cal hidratada, cal hidráulica e cal hidráulica natural.

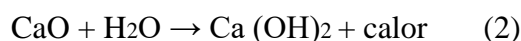
Classificando a cal aérea quanto ao teor de impurezas, esta divide-se em cal gorda e cal magra. A cal gorda tem origem em calcários quase puros com teores de carbonato iguais ou superiores a 99% e apresenta cor branca. A cal aérea magra origina de calcários com teores de argila e de outras impurezas compreendidos entre 1 e 5% e possui cor acinzentada [Coutinho, A. (1997) a)]

A cal aérea obtém-se a partir da decomposição de calcários puros tais como: carbonato de cálcio e magnésio e carbonato de cálcio com um teor de impurezas abaixo dos 5%. A cal aérea é maioritariamente constituída por hidróxido ou óxido de cálcio. O processo de

decomposição é impulsionado por um aumento da temperatura atuante, que é designado por calcinação da pedra calcária. Quando a temperatura alcança os 894 °C a pressão de dissociação do carbonato de cálcio é atingida e o dióxido de carbono é expulso do calcário. Esta reação leva a formação de grãos porosos de óxido de cálcio, normalmente conhecidos como *cal viva* (eq. 1). [Coelho, A. et al (2009). e Coutinho, A. (1997) a)]:



A cal viva pode ser definida como uma cal aérea constituída, essencialmente, por óxido de cálcio e por óxido de magnésio (CaO e MgO), esta tende a reagir com a água originando o hidróxido de cálcio, normalmente apelidado de cal apagada. O processo de hidratação do óxido de cálcio é apelidado de extinção da cal viva e basicamente consiste numa reação exotérmica que liberta grandes quantidades de calor (eq. 2). A cal viva pode ser cal cálcica ou de cal dolomítica [Alvarez, J. (1995); Coelho, A. et al (2009) e. Elert, K. (2002)].



A cal apagada era tradicionalmente deixada a amadurecer por vários meses, ou até mesmo anos, e era recomendado que a cal apagada fosse protegida do ar com cobertura superficial de água por um período mínimo de duas semanas antes da sua utilização. A cal hidratada, pode ser definida como, uma cal aérea, de origem cálcica ou dolomítica, proveniente da extinção de cais vivas. Podem ser produzidas sob a forma de pó seco, pasta ou calda (leite de cal) [Coelho, A. et al (2009) Elert, K. et al (2002)].

Numa primeira fase o endurecimento da argamassa desenvolve-se devido à perda de água em excesso, sendo que uma parte se evapora e outra parte é absorvida pela superfície porosa do suporte. De seguida começa a ocorrer o processo de carbonatação, segunda fase, este consiste na conversão do hidróxido de cálcio, juntamente com o dióxido de carbono, em carbonato de cálcio. A água que se encontra dentro dos poros internos da argamassa é vital para a dissolução do dióxido de carbono e das partículas

de hidróxido de cálcio. Nesta água ácida formam-se iões Ca^{2+} e CO_3^{2-} que, combinados dão origem ao carbonato de cálcio. A segunda fase irá durar até que toda a quantidade de hidróxido de cálcio seja convertida em carbonato de cálcio, ou então, até que a água presente nos poros se evapore devido ao calor gerado pela reação. A velocidade desta fase, pode levar anos até completar-se, depende dos seguintes fatores: temperatura, da estrutura porosa e da humidade da pasta. [Elert, K. *et al* (2002), Coutinho, A. (1997)a].

A cal aérea tem excelente poder aglomerante, capacidade de proporcionar fluidez, coesão e retenção de água. As suas partículas, muito finas, ao serem misturadas com água reduzem o atrito entre os grãos de areia, o que leva a uma maior plasticidade da argamassa e consequentemente a melhor trabalhabilidade. Permite maiores deformações a argamassa, sem fissurar, em comparação com o cimento Portland. No estado fresco retém água e não permite a sucção excessiva de água pelo suporte, devido a ser um produto alcalino impede a oxidação atuando como agente bactericida e fungicida e evita a formação de manchas e o apodrecimento precoce dos revestimentos [Coelho A. *et al* (2009)].

A produção de cal hidráulica, através da adição de cinzas vulcânicas ou cerâmica moída à cal aérea hidratada, com o intuito de melhorar a resistência mecânica e melhorar as condições de hidraulicidade das argamassas realizadas, data do século X AC. Após anos de estudo por Smeaton, Collet-Descotils e Vicat é criada a cal hidráulica artificial. A primeira fábrica de cal hidráulica nasceu em 1826 perto de Paris, França. O fabrico de cal hidráulica foi sendo otimizado, recorrendo à utilização de fornos mais sofisticados que permitiam atingir temperaturas em torno dos 1000°C , assim a calcinação ocorria a temperaturas mais elevadas, melhorando os níveis de hidraulicidade. Vicat definiu o índice de hidraulicidade como sendo a quantidade de óxidos de ácidos presentes nas argilas (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3) sobre a quantidade de óxidos de ácidos presentes nos calcários (CaO e MgO). [Charola, A.; Henriques, F. (1999) e Alvarez, J. (2005)].

A cal hidráulica natural, NHL, é o resultado da cozedura de calcários que contém um teor de impurezas entre o 8 e os 20%, sendo estas impurezas essencialmente argilas. Existem ainda as cais (hidráulicas) que resultam da cozedura de calcários puros com argilas (artificiais) e as cais (hidráulicas) que resultam da reação entre o hidróxido de cálcio e pozolanas naturais (cinzas vulcânicas ricas em sílica e alumina). A cal hidráulica é constituída sobretudo por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. A cal hidráulica tem a capacidade de adquirir presa e endurecer

submersa em água. O dióxido de carbono que se encontra na atmosfera também contribui para o endurecimento da cal hidráulica por reação com o hidróxido de cálcio [Charola, A.; Henriques, F (1999) e Coelho, A. *et al* (2009)].

A capacidade que a cal hidráulica natural tem de endurecer quando lhe é adicionada água e de endurecer tanto ao ar como submersa deve-se as impurezas presentes na sua constituição. A sílica e a alumina são as impurezas que conferem hidraulicidade a cal. No caso de o calcário ser margoso é aquecido a temperaturas a rondar os 1000°C e os 1250°C, o que leva a sílica e a alumina a reagirem com o óxido de cálcio e consequentemente leva à formação de silicatos e aluminatos de cálcio [Lanas *et al* (2004)]

A cal hidráulica tem as seguintes vantagens: boa trabalhabilidade, um aumento da resistência mecânica (em relação à cal aérea), menor retração (em relação ao cimento), boa aderência às superfícies, bom acabamento e maior rentabilidade de mão-de-obra. [Coelho, A. *et al* (2009)].

3.1.3 - Água de amassadura

3.1.3.1 - Nas argamassas

A água de amassadura é vital na produção de argamassas com ligantes aéreos e/ou hidráulicos, conferindo trabalhabilidade no estado fresco e garantindo capacidade aglutinante e a hidratação dos ligantes hidráulicos. A água de amassadura possui duas componentes, a água em excesso e a água de hidratação (do ligante) e molhagem (dos agregados). A água de hidratação e molhagem assegura boas ligações entre as partículas do sistema, por sua vez a água em excesso é a responsável pela porosidade final da argamassa endurecida e pelos fenómenos de fissuração [Coutinho, A (1997) b) e Botas, S. *et al* (2011)]

As propriedades de argamassa (a fresco e endurecida) podem ser previstas, muito frequentemente, considerando o ratio ligante/água como parâmetro chave [De Schutter, G.; Poppe, A. (2004)]. A quantidade de água de amassadura aplicada numa argamassa é preponderante para a qualidade da mesma. A quantidade de água no sistema é decisiva na consistência da argamassa no estado fresco, na aderência ao suporte e no processo de cura. Como tal a quantidade de água também condiciona as propriedades da estrutura

interna da argamassa e consequentemente do seu comportamento. Uma pequena variação na quantidade de água de amassadura irá implicar mudanças relevantes no comportamento reológico das misturas no estado fresco e consequentemente irá alterar a densidade da argamassa [Hiemenz, P.; Rajagopalan, R. (1997) e Botas, S. *et al* (2011)].

Não só a quantidade, mas também a qualidade da água de amassadura é de relevo significativo para as características finais da argamassa. Qualquer água que não apresente sabor e /ou cheiro é passível de utilização no processo de amassadura. No entanto qualquer água que apresente sabor e/ou cheiro ou materiais em suspensão não é passível de utilização, dado que, pode conter substâncias dissolvidas em suspensão que poderão afetar as características da argamassa [Coutinho, A (1997) a)].

3.1.3.2 - Nas caldas de injeção

No que diz respeito às caldas de injeção o teor de água é vital para a hidratação do ligante, mas principalmente para assegurar a fluidez da calda de injeção. Contudo, quando a água excede a quantidade necessária a hidratação do ligante pode originar exsudação à superfície e sedimentação de partículas [Perret (2002) e. Luso (2012)] sintetiza as conclusões retiradas por vários autores:

- A água pode ter sais dissolvidos na sua constituição, o que após a respetiva evaporação e cristalização pode originar eflorescências e consequentemente pressões internas relativas ao processo de recristalização [Baronio, G e Binda, L. (1983)];
- O possível excesso de água, na calda, pode diminuir a aderência ao suporte da mesma, o que leva a formação de caminhos para a água circular à volta dos elementos mais resistentes; [Miltiadou, A. (1990)]

A água ao circular dentro da parede pode dissolver os ligantes aéreos presentes ou pode hidratar a argila, hidratação esta que levaria a fenómenos de expansividade [Binda, L. *et al* (1993)]. Grandes quantidades de água, na relação água/ligante, podem levar a elevada retração da calda de injeção. Como tal, de forma a baixar a quantidade de água, têm-se recorrido a utilização de produtos expansivos, contudo estes produtos criam bolhas de ar em suspensão que diminuem a fluidez da calda.

Se existir gesso, no objeto a ser injetado, a água pode dissolver e transportar o mesmo colocando-o em contacto com possíveis produtos de hidratação da calda de injeção originando produtos expansivos [Valluzzi, M. (2000)].

A capacidade dos materiais de construção de terra de absorver grandes quantidades de água rapidamente requer que estes sejam previamente saturados e que a calda apresente uma boa capacidade de retenção de água durante o processo de injeção, este fator é essencial na manutenção da fluidez e penetrabilidade durante todo o processo de injeção [Silva, R. (2013)].

3.1.4 - Adjuvantes e outras adições

No começo do século XX teve início a comercialização dos primeiros adjuvantes, adjuvantes hidrófugos, adjuvantes aceleradores do tempo de presa e adjuvantes combinados (Hidrófugos e aceleradores de presa). No entanto a sua utilização, fruto do pouco conhecimento que se tinha sobre os mesmos, era incoerente e irracional e levou a vários erros de execução. Já á década de 30, 1938, é que a utilização de adjuvantes foi realizada de forma coerente e em grande escala [Coutinho, A. (1997) a)].

A norma NP 934-2 é a norma que define e regula o uso de adjuvantes em argamassas, caldas de injeção e betão. Adjuvante pode ser definido como uma substância, orgânica ou inorgânica, aplicada em percentagem inferior a 5% da massa do ligante que é adicionada a mistura durante o processo de amassadura dos componentes correntes. Este tem o propósito de alterar alguma propriedade do sistema ligante-água e dos materiais aplicados na mistura, no estado fresco (fluido), na transição do estado fresco para o estado sólido e no estado sólido [Paillêre, A. (1992); IPQ (2009); Coutinho, A. (1997) a) e Banfill, P. (2006)]. Os adjuvantes têm um papel importante no que diz respeito a assegurar todas as propriedades (estabilidade, durabilidade, resistência, fluidez, entre outras) exigidas nas misturas. Estes alteram a composição da mistura modificando a sua composição, características mecânicas e microestruturas [Fortes-Revilla, C. et al (2006)]

De acordo com Coutinho [Coutinho, A. (1997)] os adjuvantes têm os seguintes objetivos quando introduzidos numa mistura:

- Aumento da fluidez/plasticidade, sem aumentar a quantidade de água na mistura;

- Acelerar ou retardar o tempo de presa;
- Acelerar ou travar a progressão do endurecimento;
- Reduzir a permeabilidade aos fluidos;
- Aumentar ou diminuir a resistência aos ciclos de gelo/degelo;
- Exponenciar a tensão de rutura, sem necessitar de alterar a quantidade de cimento;

Por sua vez Luso [Luso, E. (2012)], com base em estudos de Valuzzi e Paillère [Valuzi, F (2000) e Paillère, A. *et al* (1992)] enumera os adjuvantes consoante o efeito que estes irão ter na mistura: Redutores de água, plastificantes e superplastificantes, retentor de água, retardador de presa, acelerador de presa, aceleradores de presa, introdutores de ar e agentes expansivos.

Os superplastificantes são adjuvantes que, sem alterar a consistência da mistura, reduzem fortemente a quantidade de água de uma determinada mistura, ou sem alterar a quantidade de água, aumentam consideravelmente a trabalhabilidade, podendo realizar os dois efeitos simultaneamente (fig. 26). O principal objetivo do uso de superplastificantes é a desfloculação do ligante e aumentar a percentagem de água livre na mistura. A adição do superplastificante a uma mistura tem como consequência imediata a melhoria do comportamento reológico da pasta podendo obter-se: aumento da resistência e durabilidade devido a redução da quantidade de água (ratio água/ligante), mantendo a trabalhabilidade no nível desejado ou então mantém-se a quantidade de água e melhora-se a trabalhabilidade. A adição de superplastificante pode ainda reduzir a quantidade de água e cimento para uma determinada trabalhabilidade diminuindo a fissuração e retração devido ao calor de hidratação. [Golaszewski, J. (2012); Collepardi, M. (1998) e IPQ (2009)].

Os primeiros plastificantes tinham como base os linhosufulnatos, um subproduto da indústria do papel. No Japão nos anos 60 e na Alemanha nos anos 70 apareceram os primeiros superplastificantes com base em sulfonatos de melanina e naftaleno obtidos através de técnicas de polimerização. Na década de 80 no Japão foram desenvolvidos os primeiros superplastificantes à base de policarboxilatos, significativamente mais eficientes que os anteriores, mas só a partir de 2003 é que o seu uso se tornou preponderante relativamente aos polímeros convencionais [Coutinho, A. (1997); Ramachandran, V. *et al* (2002) e Hanehara, S., Yamada, K. (2008)]

Normalmente os plastificantes são de dois tipos: condensados de formaldeído melamina sulfonados ou de condensados de formaldeído naftalenos sulfonados, estes mitigam as forças que mantêm as partículas juntas [Banfill, P. (2006); Van Rickstal, F. (2001); Paillère, A. *et al* (1992)]. Estes são constituídos por longas moléculas com uma extremidade hidrófila. As moléculas são constituídas por grupos hidrocarboxílicos (carboxilatos de sódio, cálcio entre outros), por grupos do ácido sulfónico ou por sais destes ácidos tais como os sulfonatos de sódio [Coutinho, A. (1997)].

Os superplastificantes são atrativos, oferecendo bastante fluidez com níveis de água reduzidos e, conseqüentemente, tornam as argamassas e caldas mais resistentes. Podem também manter a trabalhabilidade de uma mistura, diminuindo muito a quantidade de água usada, aumentando bastante a capacidade resistente da mistura [Banfill, P. (2006)].

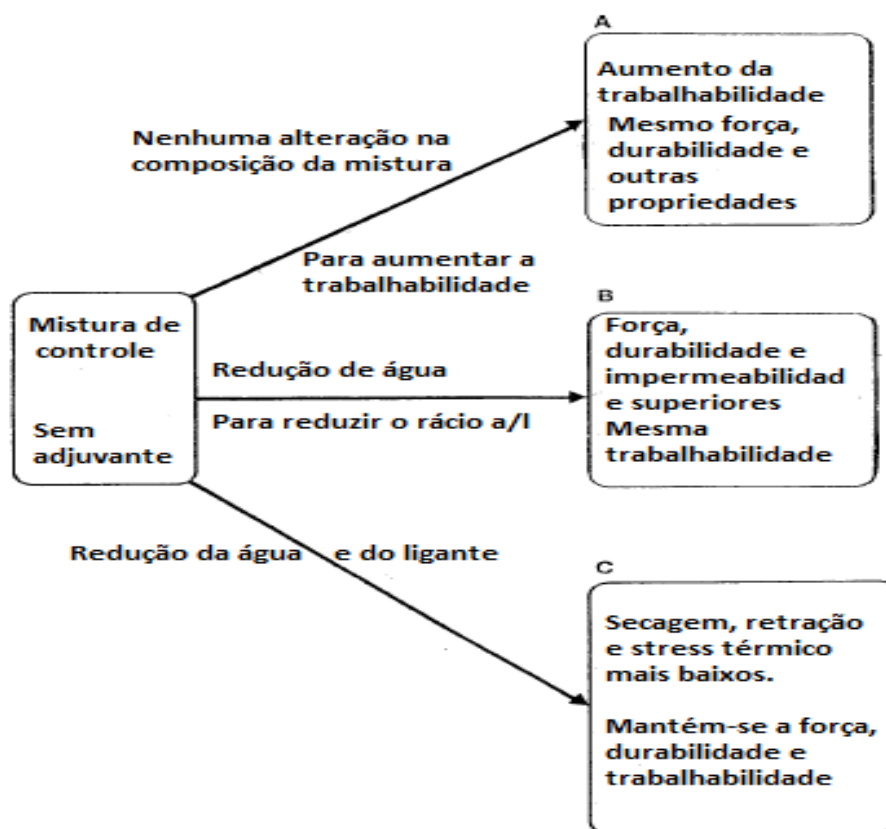


Figura 26 - Efeito do superplastificante (adaptado de Collepari, M. (1998))

Concluindo, os superplastificantes permitem a fácil aplicação de misturas, mesmo com baixos rácios água/ligante melhorando a resistência e a durabilidade [Collepari, M. (1998)].

Outras adições relevantes como as fibras em argamassas e betões refletem-se no aumento da resistência à tração, à flexão e ao choque, melhorando a ductilidade. Com o aumento da ductilidade e da resistência a tração, a adição de fibras contribui para o controlo da fendilhação, sendo este o maior ganho da aplicação de fibras em materiais cimentíceos. O controlo da fendilhação por parte das fibras é obtido através do atraso da abertura da primeira fenda, redução substancial da largura das fendas e da criação de fendilhação múltipla. A adição de fibras introduz mudanças no comportamento mecânico da mistura, pelo que, quando esta fica sujeita a tensão uniaxial e se encontra no estado de pré-fendilhação são aceites as leis das misturas. As leis das misturas definem que as propriedades mecânicas da mistura são uma média ponderada das propriedades dos seus constituintes, considerando que estes estão a atuar de forma individual. As fibras condicionam o comportamento da argamassa através dos seguintes fatores:

- Resistência à tração, módulo de Young e extensão na rotura;
- Aderência à matriz;
- Comprimento (c), diâmetro (d) e relação comprimento/ diâmetro;
- Orientação da fibra; [Veiga, M. (1998)]

Investigações sobre o uso de fibras de polipropileno revelaram aplicações em que estas, quando utilizadas em frações de volume baixas, proporcionam melhorias no comportamento do betão a um custo razoável [Keller, A. (1982); AC1 Committee 544, (1982) e Hughes, B (1976)]. As fibras de polipropileno têm propriedades únicas que as tornam compatíveis com o betão. São quimicamente inertes, são muito estáveis em ambiente alcalino e têm uma superfície hidrofóbica e, portanto, não absorvem parte da água de mistura. As fibras de polipropileno podem ser incorporadas no betão em frações de baixo volume, abaixo dos 0,3%, apenas para substituir o reforço de aço secundário que é basicamente usado para controlar a temperatura e a fissuração de retração [Soroushian, P. *et al* (1992)]. Em argamassas à base de cimento, as fibras de polipropileno conseguem retardar a abertura da primeira fenda e reduzir a tendência de fissuração inerente no início de vida da matriz, dado que, nas primeiras idades o módulo de elasticidade das fibras é superior ao da matriz de ligação [Toledo, R.; Sanjuan, M (1999)]. Já Mesbah e Buyle Bodin afirmam que as fibras de polipropileno são mais eficazes a controlar o aparecimento de fissuras, do que a reduzir a retração [Mesbah, H.; Buyle-Bodin, F. (1999)]

Em 2011 Lanas, Izaguirre e Alvarez [Izaguirre, A. *et al* (2011)] estudaram a adição de fibras em argamassas à base de cal aérea e afirmam que as fibras revelaram um bom desempenho no que diz respeito a reduzir a tendência da argamassa a fissurar, falharam em controlar a retração livre, mas revelaram minimizar a retração por excesso de água de amassadura na mistura. Os autores concluíram que a utilização das fibras em cerca de 0,06% em peso da mistura sólida, obtém-se uma argamassa mais densa que a do material de referência. Isto resulta em menor permeabilidade ao vapor de água, maior resistência mecânica, diminuição do número de fissuras formadas durante a retração e maior durabilidade em relação aos ciclos de gelo/degelo. Como tal, a aplicação de fibras de polipropileno em doses baixas (0.06%) pode ser capaz de melhorar a resistências mecânica, a durabilidade em relação aos ciclos de gelo/degelo e a fissuração em argamassas à base de cal aérea.

Segundo Sugi, Natesan e Murugesan [Sugi, D. *et al* (2007)] as fibras de polipropileno têm as seguintes características: baixo peso, alta taxa de deformação, não reagem com cimento, são hidrofóbicas e não absorvem água nem aderem quimicamente ao cimento. De acordo com Orasutthikul *et al* [Orasutthikul, S *et al* (2017)] e Spadea *et al* [Spadea *et al* (2015)] afirma que as fibras de polipropileno tiveram sucesso em melhorar as propriedades mecânicas das argamassas reforçadas de forma significativa, propriedades como: resistência à flexão, resistência à fendilhação (por exemplo, provocada pela retração) e resistência ao impacto.

3.2 - Argamassas

É possível definir argamassa como uma mistura com três componentes: agregados, com um ou mais ligantes (orgânicos ou inorgânicos) e eventualmente, ou não, com aditivos e/ou adjuvantes, em quantidades muito reduzidas, para modificar algumas características [EMOdicó, (2001), Young *et al* (1998); Neville (2011) e Hewlett, P. (2001)].

A composição das argamassas, no que diz respeito a quantidade de cada um dos seus componentes, efetua-se consoante a sua aplicação final. Se são argamassas destinadas a realização de rebocos, de assentamento de pavimentos e revestimentos ou de juntas e de reparação [Coutinho, A, (1997) a)].

3.2.1 - Argamassas na reabilitação

“As argamassas podem ter diversos tipos de aplicações em edifícios. No âmbito da conservação de edifícios históricos podem ser considerados os casos de utilizações em rebocos exteriores e interiores, no refechamento de juntas de alvenarias existentes ou como caldas de injeção para consolidação de alvenarias antigas. São também diferenciadas as características que as argamassas devem apresentar, de modo a darem resposta aos requisitos de cada tipo específico de aplicação”. [Faria, P.; Henriques, F. (2006)]

As normas europeias EN998-1 e EN998-2 classificam as argamassas de acordo com o seu local de produção e com a sua conceção. Já a EMO distingue trinta e quatro tipos de argamassas tendo em conta a sua aplicação [EMOdico, (2001) e (CEN) (2010) a) e b)].

Segundo a classificação da EMO interessa para a presente dissertação aprofundar apenas as características das argamassas de assentamento, de refechamento de juntas e de reboco. Argamassa esta que segundo as normas europeias, EN998-1 e EN998-2, quanto ao local de produção pode ser classificada como argamassa realizada em obra e quanto a conceção podemos classificar a mesma como argamassa de formulação.

3.2.1.1 - Argamassas de assentamento

As argamassas de assentamento (fig. 27) têm com funções primordiais assegurar a união estável entre elementos, a resistência a esforços mecânicos, a distribuição de cargas de maneira uniforme e a absorção de deformações da parede. As argamassas de alvenaria devem assegurar as seguintes características:

- Boa aderência;
- Resistência a esforços mecânicos;
- Capacidade de distribuição de cargas;
- Capacidade de absorção de deformações;
- Otimização da durabilidade e eficiência considerando a produção, racionalização e economia;

Simultaneamente assumem funções ao nível do isolamento, tanto térmico como acústico, pelo que, devem ter capacidade de suportar movimentos que advêm de

variações térmicas e tensões mecânicas [Smith, M.; Colis, L. (1993) e Pereira, M, *et al* (2010)]

Em condições de grandes alterações climáticas, em que se verificam ciclos gelo-degelo ou de cristalização de sais, argamassas mais fracas possuem reduzida durabilidade. Pelo que, a qualidade de uma argamassa de assentamento deve ser avaliada segundo a sua resistência (e o tempo que demora a desenvolvê-la) e sua durabilidade, tendo em conta a envolvente e a exposição a que a mesma vai sofrer. Por norma, estas argamassas são baseadas em cal ou, sobretudo, em cimentos [Smith, M.; Colis, L. (1993)].



Figura 27 - Exemplo de junta de adobe

3.2.1.2 - Argamassas de refecimento de juntas

As argamassas de refecimento de juntas são aplicadas em reabilitação quando a argamassa na junta é inexistente ou perdeu a capacidade de cumprir a função a que se proponha. As argamassas de refecimento de juntas têm como objetivos principais a proteção contra a água e a estabilidade estrutural. Deve-se ter em mente que o primeiro objetivo de uma junta é de natureza estrutural, as juntas distribuem as tensões de um elemento para o outro enquanto aumentam o coeficiente de atrito dos elementos da alvenaria impedindo que estes se movam. No entanto as argamassas de juntas também devem ter ação eficaz contra a água pelo que devem apresentar: baixa absorção de água, elevada permeabilidade ao vapor de água e alguma expansibilidade.

De forma a cumprir todos os requisitos mencionados acima as argamassas de refechamento de juntas devem possuir:

- Resistência à compressão superior as tensões que existem ou podem vir a existir na alvenaria;
- Alguma expansibilidade de maneira a criar uma boa base para a distribuição de tensões, dado que, qualquer redução da área de contacto entre os elementos da alvenaria e a argamassa da junta contribui para o aumento das tensões nessa zona;
- Alcance da cura desejada até mesmo em locais que existe dificuldade de acesso por parte do dióxido de carbono, o que exige alguma hidraulicidade;
- Capacidade de resistência elevada aos sais solúveis, na interface com a atmosfera;
- Baixa absorção capilar da água e elevada permeabilidade ao vapor da água, que devem necessariamente ser compatíveis com o tipo e características dos elementos da alvenaria, sobretudo em situações que a alvenaria irá ficar a vista sem qualquer tipo de revestimento;
- Compatibilização do desempenho;

Apesar de as argamassas de refechamento de juntas terem de possuir os requisitos acima mencionados, as características das mesmas devem ser avaliadas tendo por base o seu tipo específico de aplicação. Pelo que, se deve dividir as argamassas de refechamento de juntas em: argamassas para refechamento de juntas à vista não revestidas, argamassas de aplicação junto à superfície até cerca de 3cm de profundidade, em argamassas aplicadas em profundidade e em argamassas para refechamento de juntas de alvenarias revestidas.

As argamassas de refechamento de juntas de alvenaria revestidas aplicadas em profundidade estão menos expostas a ações exteriores quando comparadas com as que estão expostas à superfície. As argamassas aplicadas á superfície além de terem de ter em conta o aspeto estrutural têm de suportar a capilaridade e a ação dos sais solúveis. Como tal em algumas situações e devido a enfrentarem situações menos exigentes as argamassas de refechamento de juntas aplicadas em profundidade são menos trabalhadas e menos dispendiosas que as argamassas aplicadas à superfície. As argamassas para aplicação á superfície, após estarem contabilizadas com as argamassas

aplicada a profundidade e com os elementos de alvenaria, devem satisfazer o seguinte conjunto de requisitos:

- Bons níveis de aderência;
- Ligeira expansibilidade após o processo de cura;
- Reduzida absorção capilar de água;
- Elevada permeabilidade ao vapor de água;
- Elevada capacidade de resistir aos sais solúveis e aos ciclos de gelo-degelo;
- Libertação de sais solúveis baixa;
- Apropriadas características mecânicas;
- Dureza superficial;
- Cor e textura apropriadas; [Henriques, F. (2005) e Rodrigues, P.; Henriques, F. (2006)]

A norma EN 998-2 [(CEN)(2010) b)] estipula os seguintes requisitos a serem cumpridos pelas argamassas de refechamento de juntas:

- Força compressiva: Categoria M5;
- Teor de cloretos (%): 0.07;
- Força de cisalhamento inicial (N/mm²): 0.15;
- Reação ao fogo: Classe A1;
- Coeficiente de capilaridade (Kg/(m².min^{0.5})): 0.05;
- Permeabilidade ao vapor de água (Kg/(m².min^{0.5})) - 15-35;
- Condutividade térmica (W/m.K): 0.83;

3.2.1. - Argamassas de reboco

As argamassas de reboco protegem a alvenaria de ações exteriores, sobretudo contra a ação da água. Esta tem como principal função reduzir a degradação da alvenaria onde se encontram aplicadas. As argamassas de reboco devem reunir as seguintes características:

- Baixa absorção capilar e boa permeabilidade ao vapor de água;
- Estabilidade dimensional;
- Devem ser mais deformáveis e mais fracas que as alvenarias de suporte;
- Boa aderência;

- Baixa libertação de sais solúveis e boa resistência aos mesmos;
- Capacidade de resistir aos ciclos de gelo-degelo;
- Boa evaporação da água;

Presença em período de tempo suficientemente baixo, de forma prevenir deteriorações provocadas pelas resistências mecânicas iniciais insuficientes [Faria, P. e Henriques, M. (2006)]

3.2.2 - Propriedades das argamassas

No contexto prático da dissertação foram usadas argamassas à base de cal hidratada e cal hidráulica e pelo que nos parágrafos abaixo se descreve de forma sucinta as propriedades de ambos os ligantes.

A **trabalhabilidade** pode ser definida como uma propriedade de um determinado ligante, no estado fresco, que determina a facilidade com que o mesmo poderá ser misturado, colocado e compactado [Coelho, A. *et al* (2009)]. O melhor parâmetro de avaliação da trabalhabilidade é o realizado por mestres de obra utilizando a talocha e a colher. A trabalhabilidade tem quatro aspetos fundamentais: tensão resistente, retenção de água, densidade e adesão [Hendrickx, J. *et al* (2008)]. A trabalhabilidade depende em grande parte da quantidade de água, o que afetará de forma significativa a resistência à compressão e à flexão, o que, por sua vez, determinará a qualidade geral e a durabilidade de uma argamassa [Hanley, R. e Pavía, S. (2007)]. Por sua vez Rago e Cincotto concluíram que a dimensão das partículas de cal é característica predominante na trabalhabilidade das pastas de cal [Rago, F; Cincotto, M. (1999)]

O **endurecimento** da cal começa com a secagem de água em excesso, posteriormente à secagem de água em excesso ocorre o endurecimento por carbonatação (reação entre o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono), deste processo surge o carbonato de cálcio ou a calcite. O endurecimento da cal ocorre em cinco fases distintas: difusão do CO_2 através dos poros da argamassa, dissolução do CO_2 na água dos poros; dissolução do Ca(OH)_2 na água dos poros; reação entre o Ca(OH)_2 e o CO_2 ; precipitação do CaCO_3 [Johannesson, B. e Utgenannt, P. (2001)]. Já na cal hidráulica o endurecimento ocorre em duas fases, na primeira fase ocorre a hidratação dos aluminatos e dos silicatos de cálcio (tanto no ar como na água) e na segunda fase dá-se a recarbonatação da cal extinta, ao ar e na presença de dióxido de carbono [Coutinho, J. (2006)]

Retenção de água permite avaliar o que as argamassas perdem de água através da evaporação e por sucção. A perda de água por sucção ocorre devido aos tijolos, dado que estes são bastante absorventes e absorvem a água das argamassas. Alta retenção de água permite às argamassas manterem altas quantidade de água/humidade de forma a manterem plasticidade e executarem o processo de união e cura de forma adequada [Pavía, S.; Hanley, R. (2010)].

A **retração** encontra-se relacionada com a perda de volume de uma argamassa, quer seja por evaporação da água de amassadura ou por ocorrências que se prendem com a carbonatação e hidratação do ligante. A retração é extremamente condicionante no que toca a durabilidade de uma argamassa, dado que, existem fissurações que são consequência direta da retração, fissuras essas que poderão permitir a entrada de substâncias nocivas que contribuem para a degradação da argamassa. [Coelho, A. *et al* (2010)].

Resistência à compressão é o valor de rutura de determinada argamassa, é determinado recorrendo a aplicação de uma força de compressão em dois pontos opostos [EMOdico (2001)]. A **ductilidade** pode ser definida como a resistência à flexão sobre a resistência à compressão [Veiga *et al* (1994)]. O **módulo de elasticidade** é a razão entre a tensão (exercida) e extensão (sofrida) de um determinado material. Segundo Coelho *et al* [Coelho *et al* (2009)] este é o parâmetro que realmente permite determinar a deformabilidade e a capacidade de uma argamassa para acomodar deformações. ainda é possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico recorrendo a equipamentos de ultrassons. A **aderência** é a força máxima de rutura, por unidade de superfície, de uma argamassa, aplicada sob um suporte, pode ser determinada por aplicação de uma força de tração ou de corte [EMOdico (2001)]

A capilaridade, a impermeabilidade e a porosidade estão interligadas entre si. A **porosidade** pode ser definida como a relação do volume de poros existentes na argamassa e o seu volume total, a **capilaridade** é a capacidade que uma determinada argamassa tem de absorver água, de forma natural, sem existirem pressões, devido apenas à sua rede de poros e a impermeabilidade é a capacidade de uma argamassa para impedir a penetração de água, sob uma determinada pressão. Deve-se ainda referir a **permeabilidade ao vapor de água**, trata-se da resistência de uma argamassa para impedir a penetração de água, a uma determinada pressão [EMOdico (2001)].

3.3 - Caldas de injeção

3.3.1 - Definição

A injeção de caldas de injeção (grouts) é uma técnica de consolidação muito eficaz para superar o enfraquecimento estrutural. A introdução de um agente de ligação sob a forma líquida para o interior da alvenaria preenche os furos, vazios e fissuras. Após a consolidação deste agente de ligação, a alvenaria vai recuperar o seu comportamento monolítico e a resistência mecânica geral vai melhorar. Como tal, a injeção de caldas restaura o elemento de ligação em falta ou enfraquecido da alvenaria. Na situação ideal, a intervenção não pode causar qualquer dano à autenticidade estrutural e arquitetónica do edifício em causa e deve ser, dentro do possível, reversível. Neste complexo domínio e multidisciplinar da restauração, a injeção de caldas encontrou o seu lugar como uma técnica de consolidação a aplicar na alvenaria antiga dado que tem a capacidade de fortalecer a capacidade mecânica sem modificar o aspeto e integridade das paredes (fig. 28). No entanto a técnica de injeção de caldas não é reversível, mas quando os materiais aplicados são compatíveis com os materiais originais, esta torna-se uma técnica que preenche os requisitos de salvaguarda da autenticidade do edifício [Van Rickstal (2000)].

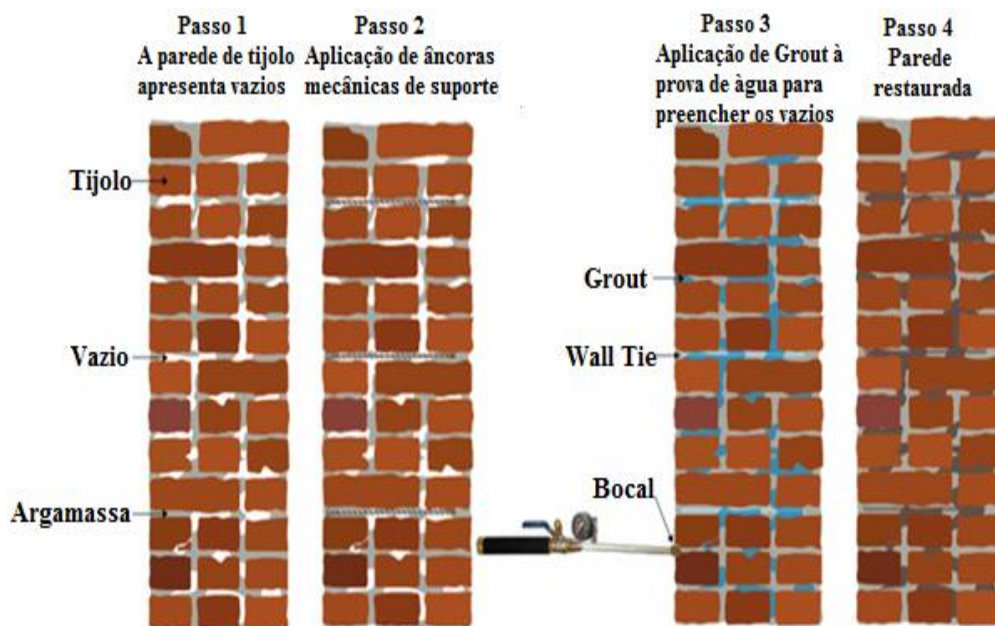


Figura 28 - Exemplo de injeção, (adaptado de masonry grout injection, 2016)

3.3.2 - Ligantes e aditivos nas caldas de injeção

De acordo com F. Jorne [Jorne, (2015)] as caldas de injeção são misturas de um ligante com água, com ou sem a adição de aditivos (fig.28). Segundo Binda [Binda, L. *et al* (1994)] as técnicas de caldas de injeção têm sido aplicadas extensivamente aplicando caldas orgânicas e caldas inorgânicas. As caldas inorgânicas utilizam cals hidráulicas, cals aéreas, pozolanas e cimentos; por sua vez as caldas orgânicas aplicam resinas poliméricas, normalmente epoxídicas [Luso (2012)].

Segundo S. Ignoul, [Ignoul (2005)] as injeções de caldas são maioritariamente executadas usando cimento e polímeros como ligantes. As injeções de caldas com recurso a polímeros como ligante, sobretudo resinas epóxi, apresentam desvantagens: são caras, tem fraca adesão a superfícies húmidas, podem originar problemas no que diz respeito à permeabilidade e ao comportamento térmico. O seu uso é apenas plausível em situações de preservação da parede e do restante edifício. As caldas de injeção que utilizam cimentos como ligante podem dividir-se, consoante a sua granularidade, em cimento, cimento ultrafino e micro cimento; a adição de superplastificantes e estabilizantes possibilita o dimensionamento de uma argamassa estável com bastante fluidez.

As caldas à base de cal aérea são, sem dúvida, as caldas mais compatíveis com os materiais originais para a consolidação de alvenaria antiga. Durante séculos a cal de ambos os tipos, cal aérea e cal hidráulica, tem sido utilizada para a construção de edifícios. O uso de caldas à base de cal para o reforço e reabilitação de alvenarias é amplamente adotado, no entanto existem desvantagens [Van Rickstal (2000)]. Tem como desvantagens um tempo de regulação e carbonatação lentos, uma elevada retração de secagem, baixa resistência mecânica [Arrizi, A. *et al* (2012)] e são muito suscetíveis ao gelo, sobretudo cal recentes não carbonatadas [Nunes, *et al* (2016)]. Por outro lado, a cal aérea possui propriedades tais como: retenção de água, ductilidade e permeabilidade, garantindo potencialmente a compatibilidade com os materiais antigos [Silva *et al* (2015)].

As caldas à base de cal hidráulica são um ligante tradicional aplicado em alvenaria predominantemente até ao início do século XX. Tal como o nome indica, é um ligante com propriedades hidráulicas. Estas propriedades hidráulicas, tal como a capacidade de fixação subaquática, dependem da composição da matéria-prima, normalmente trata-se

de um calcário silicioso e/ou argiloso [Valek, J. *et al* (2014)]. Segundo Van Rickstal [Rickstal (2000)], as propriedades hidráulicas tendem a dar uma resistência inicial aceitável enquanto que a cal proporciona a ductilidade desejada, tornando a argamassa adequada para a aplicação em áreas sísmicas. Silva e outros autores [Silva *et al* (2015)], afirmam que a cal hidráulica tem como vantagens a maior resistência em idades precoces e um tempo de fixação mais rápido e que devido a estas propriedades tem sido extensivamente estudada a sua combinação com caldas de cal área.

3.3.3 - Características das caldas de injeção

Vários autores [Vintzileou, E. *et al.* (2008)], afirmam que as argamassas à base de cimento constituem a primeira aplicação de caldas de injeção em estruturas de alvenaria. Inicialmente eram argamassas de cimento puro. No entanto, verificou-se que as suas propriedades de injeção não eram adequadas para preencher os vazios e fissuras de pequenas dimensões de alvenarias históricas, dado que podiam levar ao entupimento.

Antes de considerar as caldas de injeção uma opção viável, é necessário realizar um estudo detalhado da parede em causa para determinar a tipologia da construção, bem como o tamanho e distribuição dos espaços vazios. A compatibilidade física e química entre os materiais originais e os materiais a serem injetados é importante para evitar efeitos prejudiciais no momento de aplicação das caldas de injeção. Sendo a resistência da argamassa um fator importante - deve ser adequada, mas não excessivamente forte - sendo que este parâmetro não é o fator mais preponderante na escolha da composição do grout/calda de injeção. O fator crítico é a ligação e a injetabilidade. A composição e porosidade das argamassas e das pedras *in situ* e o tamanho dos grãos de argamassa devem ser estudados para determinar a viabilidade da aplicação de caldas de injeção [Isfelda, A. *et.al* (2016)].

Assim as caldas de injeção têm como finalidade a consolidação da ligação argamassa-pedra que precisa de reforço; o preenchimento de fendas e cavidades no interior das paredes, melhorando a continuidade da alvenaria e resistência; o preenchimento de lacunas entre dois ou mais panos da parede quando se encontram mal ligados e o melhoramento da capacidade de carga da alvenaria original [Perret, S. *et al.* (2003)].

Valluzzi [Valluzzi, M. (2000)] conclui que comparativamente a outras técnicas, a injeção tem demonstrado que é a mais eficaz no reforço de alvenarias de pedra,

sobretudo, em paredes de secção composta. Ainda Valluzzi [Valluzzi, M. *et al.* (2004)] no estudo de reforço de paredes de alvenaria de pedra de três paramentos conclui que as caldas de injeção são eficientes na homogeneização da parede e impedem o destacamento dos poros. Devido à aplicação da calda de injeção, a dilatação significativa da parede ocorre a um nível de tensão dez vezes mais elevado do que na condição original.

3.3.4 - Aplicação de caldas de injeção

Os estudos realizados acerca de caldas de injeção de paredes de alvenaria de pedra têm sido mais concentrados em paredes de 3 paramentos, dado que alguns autores [Vintzileou, E. e Tassios, T. (1995); Toumbakari, E. *et al.* (2003)] consideram este tipo de paredes o mais apropriado para aplicação da técnica de injeção.

Segundo diferentes autores [Vintzileou, E. *et al.* (2008)], a alvenaria de três paramentos é um dos tipos mais vulneráveis de alvenaria, a separação entre os paramentos exteriores e o material de enchimento, que ocorre devido ao envelhecimento e / ou devido a várias ações (sísmicas e verticais), leva ao funcionamento independente de cada paramento. A esbelteza dos paramentos externos aumenta após a separação, o que por sua vez reduz a capacidade de suporte a ações dentro e fora do plano da parede. A injeção de argamassa recorrendo a uma mistura altamente injetável e estável é uma das técnicas mais apropriadas para reforçar este tipo de alvenaria. De facto, uma argamassa hidráulica adequadamente dimensionada pode preencher até pequenos vazios e fissuras, tão estreitas quanto 0,20-0,30 mm, melhora as propriedades mecânicas de cada paramento individualmente e, simultaneamente, garante a ação conjunta dos três paramentos, diminuindo a vulnerabilidade deste tipo de alvenaria (fig.29).

Segundo alguns autores [Binda, L. *et al.* (2006)] o sucesso das caldas de injeção pode ser limitado quando a técnica é mal aplicada, devido a uma série de fatores como a morfologia da alvenaria, a desagregação e a sedimentação das argamassas, as características da mistura (distribuição de tamanho de grão) e a técnica aplicada.

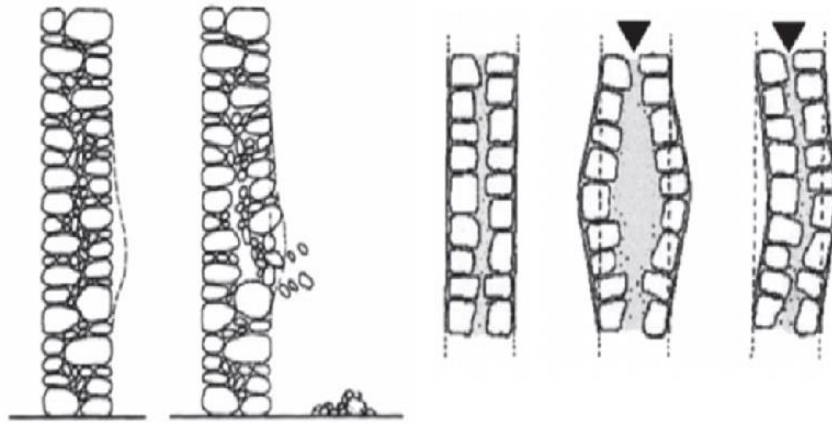


Figura 29 - Desagregação e falha de alvenaria (Retirado de *Fracture and failure of natural building stones*, 2006)

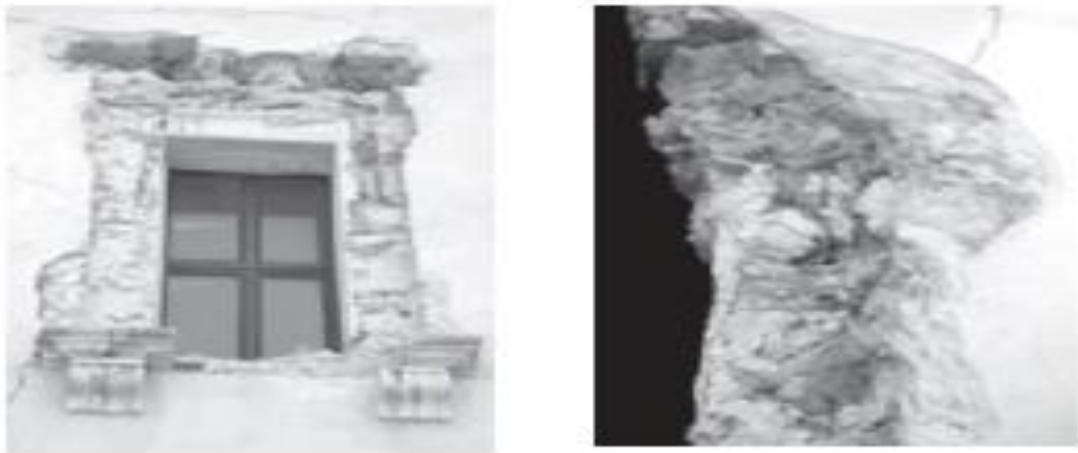


Figura 30 - Exemplo de injeções mal sucedidas (Retirado de *Fracture and failure of natural building stones*, 2006)

Os principais problemas com a injeção de caldas resumem-se às seguintes situações: falta de conhecimento sobre a distribuição de tamanhos de vazios na parede; dificuldade de a argamassa penetrar em fendas finas (2-3 mm), mesmo sendo aplicados aglutinantes muito finos; presença na parede de vazios de pequena dimensão, finos e de grande dimensão, que dificultam a escolha do tamanho de grão mais adequado da argamassa (injetar vazios de grande dimensão com uma mistura de grão de pequenas dimensões fino pode induzir segregação); dificuldade de penetração da argamassa, especialmente na presença de materiais argilosos e necessidade de aplicar baixa pressão na aplicação

da calda de injeção para evitar que o ar fique preso dentro das fissuras e vazios finos ou até mesmo na interrupção/fissuras de maior dimensão da parede (fig. 30).

Podemos então assumir que a eficácia da reparação por injeção de argamassa depende não só da característica da mistura utilizada, mas também das suas propriedades mecânicas, da técnica de injeção selecionada e da tipologia e materiais da parede em causa. O sucesso da injeção de caldas é influenciado também pela sua compatibilidade com a alvenaria a ser reabilitada. Os avanços técnicos dos últimos anos conduziram ao desenvolvimento de argamassas com características muito específicas, como por exemplo, com baixo teor de sal e agregados ultrafinos. Estes avanços levaram ainda à otimização da metodologia no processo de injeção, produzindo alterações em aspetos como a pressão de injeção ou a distância entre injetores, sempre em relação às características da alvenaria em causa. Paredes de paramentos múltiplos podem ter na sua constituição argamassas e pedras muito pobres, no entanto possuem uma percentagem de vazios muito baixa - paredes com uma percentagem inferior a quatro por cento de vazios não são injetáveis - e o núcleo é constituído por material muito solto que também não é injetável. [Binda, L. *et al* (2006)].

Já em 2003 Binda e outros autores [Binda, L. *et al* (2003)], tinham defendido que a injeção de caldas não é bem-sucedida quando aplicada em alvenaria bastante danificada e fraca, mas tem sido bem-sucedida em alvenarias onde existe uma rede comunicante entre os vazios e em que o índice de vazios está compreendido entre os 2% e os 15%. Por sua vez Valluzzi, [Valluzzi, M. (2000)], defende que abaixo de 2%, os resultados são por norma fracos, exceto em casos que esta percentagem corresponda à presença de vazios de grande dimensão. Na ausência de tais condições a injeção não é aplicável ou é pouco eficaz, havendo que recorrer a técnicas combinadas ou alternativas.

Segundo Vintzileou, [Vintzileou, E. (2006)], a aplicação de caldas de injeção (fig. 31 e 32) é constituída por vários passos, desde a preparação da alvenaria, passando pela preparação e injeção da calda de injeção até aos acabamentos e limpeza da alvenaria (fig. 31 e 32). Segundo o “Directorate for Technical Research on Restoration of the Hellenic Ministry of Culture (DTRRHMC)” são os seguintes os passos a executar:

- Preparação de alvenaria - Antes da aplicação da calda de injeção, a alvenaria tem de ser adequadamente preparada. No caso de a alvenaria ser rebocada e de o gesso não ter sido preservado, deve ser removido, para permitir uma melhor

vedação das fissuras e refechamento das juntas (se necessário), bem como para permitir o acompanhamento do procedimento. Quando não é possível remover o gesso ou não se pode danificar mosaicos (nos monumentos) durante o procedimento, devem ser tomadas medidas especiais. Se a alvenaria estiver fissurada deve-se proceder à remoção de material solto e à limpeza das fissuras existentes.



Figura 31 - Mistura e preparação de calda de injeção (retirado de Vintzileou, E. 2006)

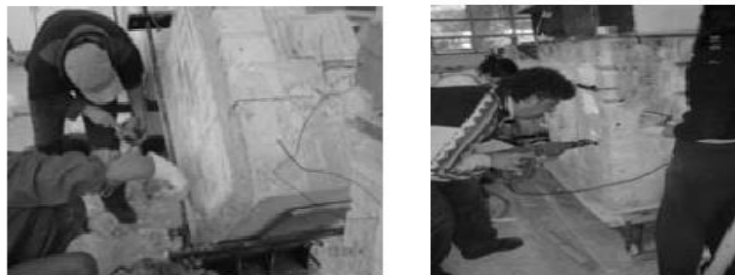


Figura 32 - Aplicação da calda de injeção (retirado de Vintzileou, E. 2006)

- Perfuração de furos de injeção e instalação de tubos de plástico - Os furos são perfurados para permitir tanto a injeção da calda como para controlar o seu excesso. Os furos devem ser profundos o suficiente de modo a que calda de injeção alcance a zona de alvenaria a ser preenchida. Os furos são realizados a distâncias adequadas, em ambas as faces da alvenaria, se possível, de maneira a formar uma grelha. A distância entre furos consecutivos depende do tipo e da espessura da alvenaria, bem como dos danos que a mesma apresenta. No entanto não deve exceder 0,50-1,00 m ou a espessura da alvenaria. A localização dos furos deve diferir de uma face para a outra. Os furos normalmente são realizados nas juntas de argamassa e devem ser inclinados para baixo. Quando a alvenaria

está fissurada, os furos também devem ser realizados ao longo das fendas, de maneira a garantir o enchimento das fissuras. Quando a alvenaria é rebocada com mosaicos a serem protegidos, os furos adicionais (de diâmetros inferiores) devem ser realizados de maneira a reduzir tanto quanto possível a quantidade de calda de injeção a transbordar. Tubos plásticos transparentes, de diâmetro igual a 10,0 mm, são instalados em todos os furos. Quando existem mosaicos ou fissuras finas de elementos arquitetônicos, o diâmetro dos tubos de plástico pode variar entre 1,0 e 10,0 mm. Os tubos de plástico alcançam profundidades diferentes na alvenaria, logo devem ser adequadamente marcados e registrados em desenho. Os tubos também devem ser numerados (de cima para baixo). As entradas e correspondentes saídas da calda são registradas, juntamente com o volume de calda consumida, bem como com qualquer alteração na pressão de injeção na entrada da alvenaria. Desta forma, o processo de injeção é bem controlado e a qualidade da intervenção é assegurada.

- Reposição e enchimento de fissuras e vazios superficiais – A reposição é necessária, quando a argamassa in situ na superfície da alvenaria está em mau estado e tem de ser substituída, para permitir a injeção eficiente. As argamassas de cal / pozolana ou argamassas hidráulicas de cal são normalmente utilizadas para reposição. Juntamente com a reposição, é necessário o enchimento de fissuras e vazios de superfície para evitar vazamento incontrolável da calda durante a sua aplicação.
- Mistura e injeção da calda - Dependendo da composição da calda a ser aplicada, pode ser utilizado um misturador de alta turbulência ou equipamento de dispersão de ultrassom. Em qualquer caso, o uso do equipamento de dispersão do ultrassom é aconselhável, quando disponível. Quando a mistura está pronta a calda é drenada para um recipiente que funciona como amortecedor para o equipamento de bombagem. Este recipiente está equipado com um dispositivo mecânico de baixa turbulência que agita suavemente a calda durante a injeção, assegurando assim a continuidade desta. A calda é bombeada para alvenaria usando um tubo flexível com um bocal de diâmetro adequado que na sua extremidade está equipado com um manômetro, para controlar a pressão. Antes do início do processo de injeção o funcionamento do sistema tem de ser verificado. A estabilidade, a densidade e a viscosidade aparente da argamassa devem ser testadas in situ, regularmente. A calda deve ser injetada a baixa

pressão (0,5 a 1 bar), sendo um procedimento de grande importância para a proteção da alvenaria, bem como para evitar a saída incontrolável de calda. A aplicação da injeção começa a partir do fundo, procedendo ao longo do comprimento do elemento a ser injetado, até ao topo, de modo a assegurar que a calda preenche todos os vazios internos. Ao mesmo tempo, é mantido um registro de tubos nos quais a calda é introduzida e a quantidade de calda consumida também é registada. Em alvenarias vulneráveis, a injeção não deve ser realizada até uma altura de alvenaria superior a aproximadamente 1m por dia, de modo a evitar uma pressão interna excessiva da calda que possa danificar a alvenaria. Concluída a injeção, a alvenaria está reabilitada. O excedente dos tubos de plástico é cortado e a alvenaria é reposta e/ou rebocada, se previsto.

3.4.6 - Propriedades físicas e mecânicas das caldas de injeção

Segundo Luso [Luso (2012)] e outros autores, abaixo citados, as propriedades mais importantes para a caracterização de caldas de injeção e que tem de ser tidas em conta para assegurar a eficiência destes materiais em trabalhos de reparação, reforço e reabilitação são as seguintes:

Fluidez - capacidade de permanecer no estado fluido por tempo suficiente, enquanto ocorre a difusão homogénea nas cavidades [Vintzileou, E. (2006)].

Estabilidade - capacidade de permanecer homogénea, antes de ocorrer a exsudação e a segregação [Valluzzi, M. (2000)].

Exsudação estática - migração de água para a superfície, com a formação de uma película de água superficial [Luso (2012)].

Segregação - tendência para os materiais se posicionarem segundo estratos. Depende essencialmente da forma, dimensão e densidade das partículas e também da quantidade de água utilizada [Luso (2012)].

Injetabilidade - Traduz a capacidade de escoamento da mistura e de manter tal característica por um período de tempo que permita uma injeção fácil da parede [Luso, (2012)].

Tempo de presa - Característica importante da mistura e que deve ser suficientemente longo para consentir a manutenção da fluidez necessária durante a fase de injeção [Luso, (2012)].

Resistência mecânica - A resistência mecânica destas caldas deverão ser, tanto quanto possível, as mais adequadas ao elemento onde vão ser aplicadas. Se, por um lado, deverão contribuir para uma substancial melhoria da coesão e da resistência mecânica do conjunto, por outro lado, esta contribuição não deverá ser muito desproporcional ao que já existe [Luso, (2012)].

Variações de volume - podem ser retração ou expansão e gerar tensões no interior do material, as quais, se forem superiores à resistência do material, provocam fissuração [Luso, (2012)].

Retenção de água (exsudação forçada) - a calda deve ter a capacidade de reter a água de amassadura dentro da mistura por um período consideravelmente longo, de forma a manter as suas propriedades durante a injeção [Luso, (2012)].

Estabilidade estática - Capacidade de permanecer homogénea sob a ação de seu próprio peso. [Hoang,Q *et al* (2015)].

Estabilidade dinâmica - capacidade de permanecer homogénea quando sujeita a elevadas taxas de cisalhamento durante o processamento, particularmente no caso de injeção. [Hoang,Q *et al* (2015)].

3.4.7 - Caldas de injeção na construção em terra

As caldas de injeção podem ser aplicadas na reparação de fissuras em construções de terra e em soluções de fortalecimento da alvenaria de terra. No entanto, apesar de as caldas de injeção desenvolvidas para alvenaria convencional apresentarem boas propriedades reológicas, as suas propriedades mecânicas e físicas, muitas vezes, não são adequadas à reabilitação de estruturas de adobe. Várias caldas de injeção à base de cimentos e cal são substancialmente mais fortes e rígidas quando comparados com o adobe e com a argamassa de assentamento. Como tal, as caldas de injeção mostram-se incapazes em atingir os níveis de deformação da alvenaria adobe gerada por cargas estáticas, sísmicas e térmicas recorrentes, causando danos indesejáveis [Silva, R. *et al* (2009)]. Estas caldas de injeção, também, possuem níveis de porosidade inferiores aos

da alvenaria de adobe, o que faz com que os mesmos atuem como barreiras de humidade afetando o transporte de vapor de água. Estes podem ainda introduzir sulfatos e outros sais que contribuem para a degradação da alvenaria de adobe. Tendo em conta as incompatibilidades acima mencionadas têm-se estudado o dimensionamento de caldas compatíveis com construção em terra [Illampas, R. *et al* (2017)].

No que diz respeito à construção em terra tem sido estudado caldas de injeção que incorporam areia, igual ou compatível com a que existe no suporte a intervir, de forma a melhorar a compatibilidade dos materiais. Roselund e Jäger *et al* e Silva *et al* [Silva *et al* (2016); Roselund, N. (1990) e Jäger W., Fuchs C. (2008)] estudaram a aplicação deste tipo de caldas. Todos os autores concluíram que não foi possível restituir a capacidade resistente inicial das paredes em estudo, no entanto todos eles concluíram que os resultados a nível de aderência, fluidez e compatibilidade são animadores.

Também Muller *et al* [Muller *et al* (2016)] estudaram a aplicação de uma calda de injeção à base de cal hidratada com adição de pozolanas, isto é, cal hidráulica. Este tipo de calda de injeção, de cal hidráulica é também capaz de alcançar requisitos de compatibilidade, proporcionando menor retração e melhor controle sobre o desenvolvimento da força resistente. No entanto, a eficácia de recuperação da capacidade mecânica é reduzida.

Os autores salientam que a técnica de calda de injeção por si só não é eficaz se a estrutura se encontra sob a ação de esforços de tração e corte, pelo que, alguns destes [Muller *et al* (2016)] recomendam o uso de rede de reforço (retrofitting).

Figueiredo [Figueiredo, A. *et al* (2012)] aplicando o uso de rede de reforço como técnica de reforço em adobe, as fendas foram preenchidas com apenas com uma mistura de cal hidráulica e água, provou ser bastante eficaz superando a capacidade resistente inicial da parede. Os testes revelaram que nas paredes ensaiadas a força lateral aumentou ligeiramente e a capacidade de ductilidade e dissipação de energia melhorou de forma significativa, tendo sido recuperada a rigidez inicial. O uso de rede de reforço envolvendo paredes de adobe e com rebocagem de argamassa também é possível. A malha é colocada em tiras horizontais e verticais, seguindo um formato semelhante ao das vigas e colunas. Esta solução é capaz de proporcionar força adicional à estrutura, embora o modo de falha observado seja quebradiço e perigoso [Varum *et al.* (2014)].

4 - Estudo de soluções de reabilitação de paredes em adobe

Este capítulo expõe o estudo experimental efetuado sobre soluções de reabilitação de paredes de adobe. Em primeiro lugar apresenta-se a caracterização dos adobes, argamassas e caldas de injeção. Em segundo lugar apresentam-se e discutem-se os resultados dos ensaios realizados aos elementos em estudo.

O objetivo deste trabalho foi focado no desenvolvimento de soluções de reabilitação de paredes de adobe que sofreram danos mecânicos ou que necessitem de uma intervenção para minimizar o problema da ascensão capilar de água nas paredes.

4.1 - Metodologia Experimental

A abordagem experimental efetuada neste trabalho envolveu a caracterização de tijolos de adobe a usar em testes laboratoriais e testes piloto, bem como o desenvolvimento de argamassas, caldas de injeção e outras soluções complementares de reabilitação de paredes em adobe. As argamassas de reabilitação com base em cal aérea e cal hidráulica foram desenvolvidas para os testes e ensaios piloto sobre a ascensão capilar e para os ensaios relativos ao reforço mecânico das paredes de adobe. As caldas de injeção desenvolvidas foram usadas especificamente para este último caso de estudo. No caso de estudo do reforço mecânico foi ainda usado uma rede elástica como solução complementar às argamassas de reforço e caldas de injeção. Os testes laboratoriais de uma série de composições de argamassas e caldas permitiram depois escolher duas delas para os ensaios piloto efetuados já em paredes de adobe.

4.1.1 - Caracterização do adobe

Em primeiro lugar foi então efetuada uma caracterização do adobe a ser utilizado nos testes laboratoriais e na construção de paredes para os ensaios piloto da ascensão capilar e do reforço mecânico. Esta caracterização é importante para o objetivo de compatibilizar as argamassas e caldas de injeção a desenvolver para a sua reabilitação posterior.

Os tijolos de adobe em estudo são provenientes de uma habitação demolida, localizada na Gafanha da Nazaré em Aveiro. Fez-se uma nomenclatura identificativa dos adobes por local de extração dada a sua elevada heterogeneidade. Dado que os adobes são

provenientes de uma demolição continham na sua superfície, restos de argamassa de base cimentícia e de cal (já não da sua constituição inicial), o que obrigou a que estes sofressem uma intervenção de limpeza às suas superfícies (fig. 33).



Figura 33 - a) Ferramentas utilizadas na b) Limpeza de adobes

Após a limpeza foram retiradas 10 amostras de adobes diferentes (fig.34). As amostras retiradas possuem geometria cúbica com volume de aproximadamente $85 \times 85 \times 85 \text{ mm}^3$.



Figura 34 - Cubos de adobe

De maneira a caracterizar o adobe foram efetuados uma série de ensaios, no estado endurecido. Os ensaios realizados foram os seguintes: módulo de elasticidade dinâmico (PUNDIT), densidade aparente, absorção por capilaridade, porosidade aberta e massa volúmica aparente, ensaios mecânicos e de determinação do traço por dissolução.

Todas as amostras de adobe foram pesadas e medidas para o cálculo da densidade. A **densidade aparente** é a razão entre a massa (m) e o volume (V) de um determinado objeto (eq. 3):

$$d_{ap} = \frac{m}{V} \quad (3)$$

O **módulo de elasticidade** foi calculado recorrendo ao PUNDIT. O PUNDIT não oferece uma medida do módulo direto, o PUNDIT regista o tempo, em microssegundos, que demora o sinal emitido pelo transdutor emissor a chegar ao transdutor recetor. Sabendo o tempo e a distância percorrida é possível calcular a velocidade (eq.4):

$$v = \frac{d}{t} \quad (4)$$

Sabendo a velocidade e a densidade aparente é possível calcular o módulo de elasticidade, E_d (eq.5):

$$E_d = d_{ap} \times v^2 \quad (5)$$

De seguida foi realizado o ensaio de **absorção por capilaridade** (fig.35) de acordo com a norma EN 1015-18. A equação geral que define o índice de capilaridade é (eq.6):

$$\frac{M_2 - M_1}{A} = C \sqrt{ti} \quad (6)$$



Figura 35 - Ensaio de capilaridade nos cubos de adobe

Após o ensaio de absorção por capilaridade os cubos foram colocados novamente na estufa, durante 24 horas, a 60° para ficarem secos. Após esse período foram realizados os ensaios de cariz mecânico aos cubos.

Foi avaliada a **resistência à flexão e à compressão** de quatro cubos de adobe. O ensaio foi realizado na máquina de ensaios, Shimadzu, segundo a norma EN1015-11 para ambos os ensaios (resistência à flexão e resistência à compressão

Os restantes cubos de adobe foram sujeitos ao ensaio de **porosidade aberta e massa volúmica aparente**. A determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta, baseou-se na norma EN 1963. A massa volúmica aparente (MV_{ap}) e a porosidade aberta (P_{ab}) são dadas pelas equações 7 e 8:

$$MV_{ap} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 [\text{kg/m}^3] \quad (7)$$

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 [\%] \quad (8)$$

onde, m_1 é a massa do provete seco [g], m_2 é a massa do provete saturado imerso [g] e m_3 é a massa do provete saturado [g].

Por fim foi realizada a **dissolução de adobe em ácido clorídrico** de forma a calcular a quantidade de resíduos insolúveis, ou seja, para determinar aproximadamente o traço presente neste material. Este ensaio segue a norma interna aplicada no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro Pesou-se 50 gramas de adobe, que foi posteriormente colocado num almofariz de porcelana e desagregado. De seguida adicionou-se num copo de vidro ácido clorídrico diluído (1:5), cuidadosamente para que a efervescência estivesse sempre controlada (fig.36). O preparado foi então colocado numa placa pré-aquecida e fervido durante 2 minutos deixando-se, de seguida, a repousar. De seguida filtrou-se a suspensão obtida e secou-se o filtro numa estufa a uma temperatura de 100 °C. Posteriormente à secagem pesou-se o filtro com e sem o resíduo seco, m_r e m_0 . O cálculo da quantidade resíduo insolúvel é realizado da seguinte forma (eq. 9):

$$\%Res_{insolúvel} = \frac{m_r - m_0}{m_a} \times 100 \quad (9)$$

onde, m_r é a massa do filtro com resíduo (g), m_0 é a massa do filtro (g) e m_a é a massa da amostra (g).



Figura 36 - Ensaio de dissolução do adobe

4.1.2 - Desenvolvimento e caracterização das argamassas de reabilitação

Com o objetivo de desenvolver argamassas de reabilitação para juntas e reboco das paredes de adobe foram realizadas, primeiro em laboratório, formulações, visando o refechamento de juntas, com teores relativos diferentes de areia fina e grossa, mas sempre com a mesma percentagem de ligante NHL 3.5. Foram também testadas argamassas correntemente aplicadas nas juntas e nos rebocos. Nas juntas foi aplicada argamassa à base de cal aérea com traço 3:1 (agregado: cal aérea), sendo a argamassa considerada como de referência em todos os ensaios incluindo os ensaios piloto em muretes de adobe. Nos rebocos foram testadas argamassas de traço 2:1 com ligantes diferentes, cal aérea e cal hidráulica NHL 3.5. As areias utilizadas como agregado (areia de Vale de Ílhavo e areia Salgueiro) nas argamassas de refechamento de juntas possuem as curvas granulométricas apresentadas abaixo (fig. 37).

A areia de Salgueiro (areia grossa G) foi sempre peneirada no peneiro de 4.75mm antes de adicionada as formulações de argamassas sendo a areia de Vale de Ílhavo mais fina (F) usada tal e qual. Foi testada a adição de fibras de propileno e um superplastificante, com o intuito de melhorar a argamassa de reabilitação em estudo.

As formulações realizadas no desenvolvimento de argamassas de reabilitação (tabela 3) foram avaliadas quanto à sua **compacidade**. As percentagens expostas são referentes ao peso total da amostra no caso do ligante e dos agregados, no caso da água e possíveis adições as percentagens são sempre sobre o peso total dos constituintes base.

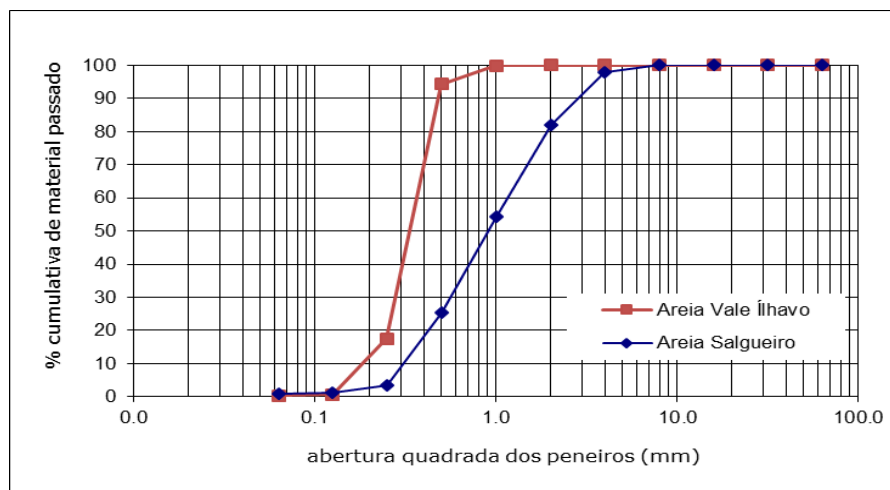


Figura 37 - Granulometria das areias utilizadas como agregados

Tabela 3 - Misturas de agregados finos e grossos na argamassa

Designação Composição (ligante, finos, grossos)	Teor (%)			
	Cal Hidráulica NHL3.5	Areia Fina (F)	Areia Grossa (G)	Água
NHL 90F 10G	25	90	10	16
NHL 85F 15F	25	85	15	16
NHL 80F 20G	25	80	20	16
NHL 70F 30G	25	70	30	16
NHL 50F 50G	25	50	50	16
NHL 30F 70G	25	30	70	16
NHL 10F 90G	25	10	90	16

No estado fresco as formulações foram sujeitas a ensaios de trabalhabilidade. O ensaio da trabalhabilidade é realizado numa mesa de espalhamento, seguindo as especificações da norma EN 1015-3. Em primeiro lugar a trabalhabilidade foi avaliada na composição 50|50. Foi introduzida uma pequena quantidade de água na mistura (13%), a qual foi misturada com uma misturadora mecânica. Não tendo sido alcançada a trabalhabilidade desejada, foi adicionada mais água à mistura. A introdução de água foi feita de forma doseada sendo introduzido 1% de água de cada vez; a cada introdução de água a trabalhabilidade foi avaliada, sendo que a trabalhabilidade desejada foi alcançada com 16% de água. As restantes formulações foram testadas, em termos de trabalhabilidade, com

uma adição de 16% de água em todas elas. A avaliação destas no que diz respeito à trabalhabilidade também teve em consideração a segregação de grossos e a homogeneidade da mistura. Após os ensaios de trabalhabilidade foram realizados três provetes de cada uma das amostras e os mesmos ficaram a curar durante 28 dias (na camara climática de 95%HR a 60°C).

No estado endurecido foram realizados os ensaios de densidade e resistência mecânica, seguindo as normas aplicadas na caracterização do adobe. Após a realização destes três ensaios foi selecionada a mistura que apresentava a maior **compacidade**. Foi realizada uma nova amostra desta formulação e foi adicionado superplastificante à mesma para aferir o efeito que o mesmo terá na reabilitação de problemas relacionados com a ascensão capilar

O **superplastificante** aplicado foi o *Sikaplast 805*, introduzido para permitir reduzir a quantidade de água na formulação, mantendo ou aumentando a trabalhabilidade para a mesma proporção de água. Tendo em conta que as argamassas em estudo vão ser aplicadas em soluções de reabilitação, expostas e sensíveis a problemas decorrentes do fenómeno de capilaridade ascensional desenvolveram-se estudos (com ensaios laboratoriais) com foco na diminuição do teor de água no traço das argamassas, sem nunca se descuidar a trabalhabilidade das mesmas. A quantidade máxima de superplastificante adicionado às amostras foi de 0.5 % e o ensaio utilizado para aferir a menor quantidade de água possível na mistura mantendo o slump desejado foi o da trabalhabilidade (EN 1015-3). Para determinar a menor percentagem de água possível foi adicionada á amostra apenas 11% de água e 0.1% de superplastificante e foi determinada a trabalhabilidade. Não sendo a desejada é adicionado mais superplastificante à mistura até aos 0.5% de 0.1 em 0.1%. A trabalhabilidade pretendida, com 11% de água e 0.5% de superplastificante, não foi alcançada. Foi adicionado 0.5% de água à mistura, e a trabalhabilidade obtida continuou a ser insatisfatória. Realizou-se uma nova amostra da mesma mistura e o processo foi repetido, mas desta vez a quantidade de água inicial introduzida foi de 12% e foi obtida a trabalhabilidade desejada (tabela 4).

Foram recolhidos provetes da formulação com 12% de água e 0.5% de superplastificante para se realizarem ensaios no estado endurecido aos 28 dias de cura. No estado endurecido os provetes foram sujeitos aos seguintes ensaios: densidade, absorção por capilaridade, porosidade aberta, módulo de elasticidade e resistência

mecânica. Todos os ensaios seguem as normas já acima referidas (na caracterização do adobe).

Tabela 4 - Adição de superplastificante às formulações de argamassa

Formulações	% de água	SP (%)
I	11	0.1
		0.2
		0.3
		0.4
		0.5
	11.5	0.5
II	12	0.1
		0.2
		0.3
		0.4
		0.5

Os ensaios de absorção por capilaridade, de porosidade aberta e do módulo de compatibilidade assumem-se como principais no estudo da adição de superplastificante, dado que, a adição do mesmo visa a resolução de anomalias relacionadas com a capilaridade ascensional. Os restantes ensaios serviram para identificar as restantes características da amostra em estudo e se a mesma era passível de aplicação na resolução de problemas estruturais.

Com o intuito de melhorar o comportamento mecânico das argamassas, foi também testada a **adição de fibras** de polipropileno (com 6 mm de comprimento). Estas podem conferir maior capacidade resistente à argamassa, no entanto, a adição de fibras foi testada pensando também nos dois problemas em estudo: ascensão capilar e reforço de danos estruturais. Foram realizadas quatro formulações (III, IV, V e VI) da mistura com maior compacidade, com 12% de água e 0.5% de superplastificante, às quais foram adicionados diferentes teores de fibras (tab.5).

No estado fresco foi testada a trabalhabilidade de todas as amostras (EN 1015-3). Nenhuma delas atingia a trabalhabilidade pretendida com 12% de água. O teor de superplastificante já se encontrava no valor máximo estipulado (0.5%), a quantidade de água foi aumentada em todas as amostras até atingirem a trabalhabilidade desejada (tabela 5).

Tabela 5 - Adição de fibras à argamassa

Formulação	teor de fibras (%)	SP (%)	Água (%)
III	0.2	0.5	13.5
IV	0.3	0.5	14
V	0.4	0.5	14.5
VI	0.5	0.5	15

Foram recolhidos provetes das quatro formulações e, passados 28 dias de cura, estes foram sujeitos aos seguintes ensaios: densidade, módulo de elasticidade, resistência mecânica, absorção por capilaridade e porosidade aberta. Todos estes ensaios seguiram as normas já especificadas no ponto referente a caracterização do adobe.

Na adição de fibras todos os ensaios assumem a mesma importância. Sob o ponto de vista da resolução da capilaridade ascensional foi estudado o coeficiente de capilaridade e a porosidade aberta, no que diz respeito a resolução de danos estruturais foi avaliada a capacidade resistente à flexão e à compressão. Para a resolução de ambos os problemas foi estudada a compatibilidade do módulo de elasticidade das amostras com o suporte.

A **argamassa de junta** com ligante de cal aérea e traço 3:1 foi sujeita a ensaios no estado endurecido. As **argamassas de reboco**, de cal aérea e hidráulica, com traço 2:1 também foram sujeitas a ensaios no estado endurecido. Todas as argamassas foram sujeitas aos seguintes ensaios: densidade, módulo de elasticidade, resistência mecânica, absorção por capilaridade e porosidade aberta. Todos os ensaios foram realizados em conformidade com as normas ou procedimentos já referidos anteriormente.

4.1.3 - Desenvolvimento e caracterização das caldas de injeção para reabilitação

Com o intuito de reforçar mecanicamente paredes de adobe fissuradas foram desenvolvidas caldas de injeção, o que também conduziu à realização de 14 formulações em laboratório. Todas as formulações tiveram como ligante a cal hidráulica NHL 3.5 e como agregado a areia de vale de Ílhavo, em percentagens variadas entre formulações. Nenhuma formulação continha areia grossa, dada à exigência de uma calda de injeção fina e com bom escoamento. Foi estudada a adição de superplastificante, de farinha de sílica SS 160 como filler e a adição de fibras. Oito das

formulações estudadas contêm farinha de sílica e fibras em simultâneo. Todas as formulações têm superplastificante na sua composição. A introdução de superplastificante e fibras nas caldas de injeção de reabilitação teve como o objetivo a redução de água de amassadura e o melhoramento da capacidade resistente das mesmas, respetivamente. Tal como nas argamassas de reabilitação as percentagens expostas tabela 6 são referentes ao peso total da amostra no caso do ligante e dos agregados, incluindo a farinha de sílica e, no caso da água e das adições, as percentagens são sempre sobre o peso total dos constituintes base

Tabela 6 - Formulações de caldas de injeção

Designação	Teores em %					
	NHL3.5	Agregados	Filler	Água	SP	Fibra
NHL5050	50	50	0	20	1	0
NHL5545	55	45	0	20	1.2	0
NHL5545I	55	45	0	20	1.2	0.1
NHL5545II	55	45	0	20	1.2	0.2
NHL6035S5	60	35	5	30	1.2	0
NHL6035S5 I	60	35	5	30	1.2	0.1
NHL6035S5II	60	35	5	30	1.2	0.2
NHL6035S5 III	60	35	5	30	1.2	0.3
NHL6030S10	60	30	10	30	1.2	0
NHL6030S10 I	60	30	10	30	1.2	0.1
NHL6030S10 II	60	30	10	30	1.3	0.2
NHL6030S10 III	60	30	10	30	1.3	0.3

No estado fresco foi testada a fluidez e a facilidade de injeção de todas as formulações. O ensaio utilizado na avaliação da fluidez foi adaptado a partir da NP EN 445 (2008), dado que o cone de Marsh disponível em laboratório (fig. 38) possui dimensões diferentes do estipulado na norma. O ensaio consiste no tempo em que um determinado volume de calda (200ml) demora a ser escoado pelo cone, pelo que o volume introduzido no cone tem de ser igual em todas as caldas. Quanto mais rápido a calda for escoada mais fluída é. Deve ser introduzida água no cone antes da realização do ensaio de forma a verificar o funcionamento do equipamento. O bocal de saída deve ser tapado enquanto a calda está a ser introduzida no cone.

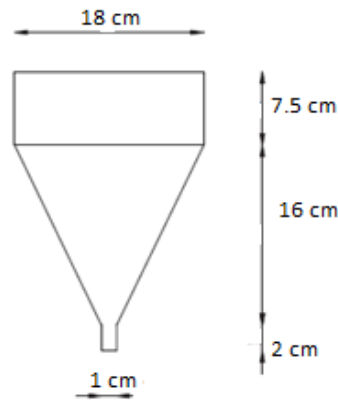


Figura 38 - Cone de marsh utilizado nos testes de fluidez

O ensaio referente a facilidade injeção não segue nenhuma norma. O ensaio consiste, após o ensaio da fluidez, na introdução da calda, no estado fresco, numa seringa com um bocal de saída com diâmetro de 0.5cm (fig.39). Deve-se preencher por completo o reservatório da seringa para que seja eliminado o ar presente. De seguida procede-se à injeção, a mesma é feita ao “ar livre”. É analisada a facilidade com que a mesma sai da seringa quando aplicada força e se a calda não entope o bocal de saída. O ensaio é satisfatório quando o bocal não é entupido e é bom quando a calda flui com facilidade.



Figura 39 - Seringa utilizada no ensaio de facilidade de injeção

Todas as formulações realizadas visavam o aumento de fluidez e capacidade de injeção. O objetivo nesta fase era assegurar a maior quantidade possível de finos e a presença de fibras na mistura assegurando a fluidez pretendida.

As formulações expostas na tabela 5 estão organizadas pela ordem em que foram ensaiadas à fluidez e à facilidade de injeção. A primeira calda não alcançou a fluidez desejada. Aumentou-se a quantidade de cal e de superplastificante e os resultados foram mais satisfatórios, mas com a introdução de fibras (0.1% e 0.2%) a fluidez pretendida não foi alcançada. De seguida considerou-se a introdução de sílica, agente retentor de água em 2 percentagens distintas, 5 e 10%. Acompanhando a introdução de sílica o superplastificante e a quantidade de água foram aumentados. As caldas de injeção com sílica, *NHL3060S10* e *NHL6035S5*, demonstraram resultados satisfatórios. Todas as caldas em estudos foram passíveis de injeção sendo esse o critério que manteve as mesmas em estudo.

Tal como no desenvolvimento das argamassas foram recolhidos 3 provetes de cada amostra que estiveram a endurecer 28 dias e foram realizados ensaios no estado endurecido. Os ensaios executados no estado endurecido foram: densidade, módulo de elasticidade, porosidade aberta e resistência à flexão e à compressão. Tal como as argamassas de reabilitação os ensaios das caldas seguiram as normas já estipuladas na caracterização do adobe.

No estudo e caracterização de caldas, no estado endurecido, os ensaios mais relevantes foram o módulo de elasticidade e a resistência mecânica. No entanto conhecer o coeficiente de capilaridade das caldas é importante, dado que, quanto menor for o mesmo mais resistência a calda tem á anomalias causadas pela água.

4.1.4 - Ensaio piloto em paredes de adobe

Na atividade experimental foram realizados ensaios piloto sobre a ascensão capilar e sobre o reforço mecânico das paredes de adobe. A realização dos ensaios e testes efetuados envolveu a realização de 7 muretes de adobes. Para o estudo das soluções de reabilitação de capilaridade ascensional foram usados 4 muretes onde se testaram as argamassas de refechamento de juntas selecionadas a partir dos estudos laboratoriais. Para o estudo das soluções de intervenção relacionadas com danos estruturais induzidos nas paredes de adobe foram usados 3 muretes envolvendo a utilização de caldas de injeção, argamassas de reabilitação e uma rede de reforço estrutural.

4.1.4.1 - Ensaios do estudo de soluções para a ascensão capilar

Para a realização de ensaios de soluções para a ascensão capilar foram construídos 4 muretes de adobe. Cada murete foi construído dentro de um caixote de madeira, e depois do tempo de cura das argamassas de junta foram realizados ensaios de absorção por capilaridade em 3 muretes (I, II e III).

Os caixotes usados no ensaio foram impermeabilizados com folha plástica e colocado um geotêxtil dentro dos mesmos, em cima do qual foi realizada uma camada de argamassa como base (3:1 de cal aérea) para a construção do murete (fig.40). Todos os adobes foram regados para saturar com água antes de serem aplicados na construção dos muretes. Este processo foi aplicado na construção dos muretes I, II e III. A primeira junta do murete I foi realizada com cal aérea traço 3:1; a primeira junta do murete II foi realizada com a argamassa de junta **NHL80/20** com 16 % de água e a primeira junta do murete 3 foi executada com a argamassa **NHL80/20** com 12% de água e 0.5% de superplastificante. O murete 4 foi construído da mesma forma e nas mesmas condições, mas foi executada mais uma fiada no mesmo e a primeira junta foi construída com cal aérea traço 3:1. O murete I serviu como referência para este ensaio piloto sobre a ascensão capilar.



Figura 40 – Murete de 3 fiadas para o estudo de ascensão capilar

O ensaio realizado foi igual em todos os muretes. O ensaio realizado foi adaptado da norma do ensaio de absorção por capilaridade. EN 1015-18. Como não era possível retirar os muretes dos caixotes e pesá-los foi necessário adotar outra metodologia. Como tal o ensaio foi controlado pela quantidade de água introduzida em cada caixote e pela altura de água nos muretes. Para ser possível controlar a quantidade de água absorvida

os muretes foram marcados na primeira fiada na interface do adobe com a camada de regularização, para garantir a quantidade de água mínima necessária ao ensaio, e foram marcados cerca de 5cm acima dessa marca. Ao longo do ensaio a água esteve sempre entre essas duas marcas. Sempre que havia necessidade de introduzir água nos caixotes o recipiente com água era pesado antes e depois da introdução de água sendo a diferença de massas a quantidade de água absorvida pela parede.



Figura 41 – Marcação do adobe



Figura 42 – Medição da altura de água no murete

Os ensaios de todos os muretes tiveram duração de dias. Nas primeiras 24 horas eram efetuadas várias medições. A partir das 48 horas eram realizadas entre uma a duas medições por dia. O método de medição era realizado com uma régua metálica (fig. 41 e 42), em primeiro lugar era medida a altura de água no caixote e era repostada se assim fosse necessário e era registada a massa de água introduzida; em segundo lugar era medida a altura de água. A medição de altura de água foi feita através da medição de vários pontos, enquanto a água se encontrava no adobe eram feitas cerca de 6 medições, quando a água estava na junta eram efetuadas mais de 10 medições

Após os 3 muretes serem ensaiados foi escolhida a argamassa que teve melhores resultados e foi aplicada no murete IV como técnica de reabilitação e reforço. Foram abertos roços (fig.43) na primeira e na segunda fiada do murete IV (fig. 42), estes roços foram abertos até cerca de metade da largura dos adobes e foram feitos em faces diferentes do adobe para permitir a colocação da argamassa de corte hídrico. A abertura dos mesmos foi executada com ponteiros metálicas.



Figura 43 – Abertura de roços (murete IV)



Figura 44 – Colocação de calços (murete IV)

Os roços foram realizados primeiramente nas laterais e foram avançando para o centro do murete, eram colocados calços de madeira (fig. 44) nas aberturas enquanto a argamassa não era colocada. Após a abertura dos roços os mesmos foram molhados com água e foi aplicada a argamassa que apresentou melhor resultado no ensaio piloto. A introdução de argamassa na junta foi executada com colher de pedreiro e talocha. A compactação da argamassa, de forma a preencher corretamente a junta, foi executada

com um calço de madeira (fig. 45). Por fim, foram colocadas peças de madeira em algumas zonas das juntas enquanto estas endureciam (fig. 46).



Figura 45 – Aplicação da argamassa de reabilitação na junta



Figura 46 – Cura da argamassa

4.1.4.2 - Ensaios do estudo de soluções para reforço estrutural

Para a realização de ensaios de soluções para reforço das paredes de adobe após danos estruturais foram realizados 3 muretes de 7 fiadas. Todos os muretes foram ensaiados à compressão. Após os ensaios de compressão os 3 muretes foram sujeitos a diferentes soluções de reabilitação combinando caldas de injeção, argamassas de reabilitação e rede de reforço. Após serem reabilitados os muretes foram novamente ensaiados à compressão.



Figura 47 – Murete de 7 fiadas para ensaio piloto sobre o reforço estrutural

No local de instalação do murete, no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, foi primeiramente colocado um plástico no chão para evitar o contacto direto dos muretes com o mesmo. Após a colocação do plástico foi executada uma camada de regularização com argamassa à base de cal aérea com traço 3:1. As fiadas dos muretes foram executadas, tal como nos ensaios de capilaridade, de forma alternada com uma fiada de adobes inteiros (2) e uma fiada de meio adobe, adobe e meio adobe. Todos os adobes foram molhados antes de serem aplicados de forma a garantir uma boa aderência posterior. A argamassa de juntas aplicada foi à base de cal aérea com traço 3:1, como aplicado tradicionalmente (fig. 48).

Os muretes após construídos foram rebocados (fig. 49) de acordo com o traço tradicional em cal aérea (3:1). Foram recolhidas amostras do traço de argamassa de juntas e do traço do reboco de cada um dos muretes para ensaios no estado endurecido. As argamassas aplicadas na realização dos muretes estruturais, tanto a de junta como a de reboco foram realizadas *in situ* com recurso a mistura em betoneira.

Os muretes, e as amostras recolhidas, tiveram um tempo de cura de 180 dias, ao fim dos quais os muretes foram sujeitos a ensaios de compressão. O ensaio de compressão é realizado com o auxílio de uma viga metálica HEB 300 que carrega os muretes, de forma uniforme e constante (0.1mm/s) até os muretes atingirem as suas respetivas

forças máximas de rotura. A viga está conectada a um atuador, que neste caso tem capacidade de 300 KN. A viga e o atuador estão fixados num pórtico móvel que é possível mover consoante o murete a ensaiar (fig. 50). Com o auxílio de sensores e software de modelação é possível conhecer os valores de força máxima e deslocamentos sofridos pelos muretes.



Figura 48 – Realização de murete estrutural



Figura 49 – Aplicação de reboco e recolha de amostras

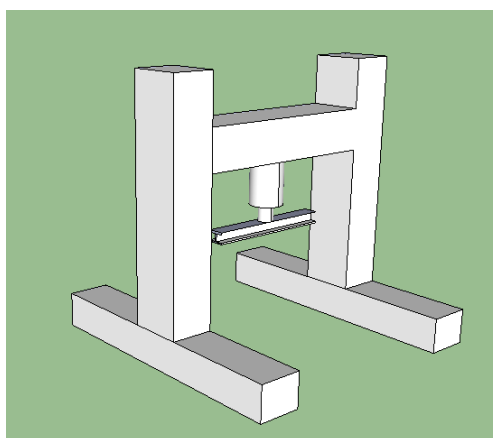


Figura 50 – Modelo da viga e pórtico usado nos ensaios mecânicos

Em primeiro lugar procedeu-se à colocação dos sensores nos muretes. Foram colocados sensores nas duas faces de maior dimensão dos muretes. Os sensores são alinhados a partir do centro da face dos mesmos. São marcados os pontos onde as extremidades de cada sensor vão ser fixadas e são feitos furos, nesses mesmos pontos, com o martelo elétrico, sendo de seguida colocados varões de aço fixados com bucha química (fig. 51).



Figura 51 – Preparação dos muretes para a introdução dos sensores

Os sensores utilizados são numerados e ligados a caixas específicas que são ligadas ao software de cálculo, como tal as faces dos muretes foram definidas como “frente e “trás” e os sensores aplicados às faces são sempre os mesmos e estão sempre na mesma posição seja qual for o murete a ensaiar (V, VI ou VII). Na figura abaixo (fig.52) é mostrado o esquema de cada face com os sensores aplicados

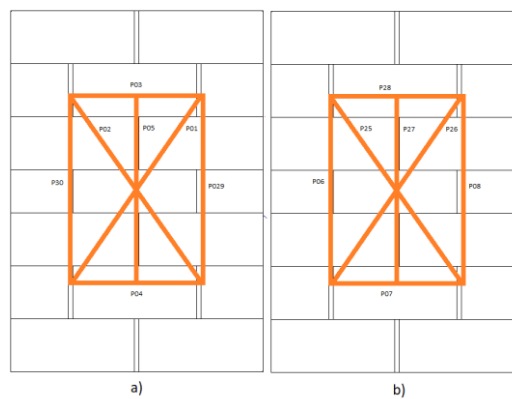


Figura 52 – Esquema de montagem dos sensores a) “frente” b) “trás”

Após a colocação é aplicada uma camada de argamassa de regularização no topo dos muretes, com o intuito de distribuir a força aplicada pela viga de forma uniforme (fig. 53).



Figura 53 - Aplicação de camada de regularização

Após verificar o equipamento todo inicia-se o ensaio e através de máquina fotográfica e câmara de filmar os ensaios são registados (fig. 54).



Figura 54 - Ensaio pronto a correr, “trás” do murete VII

Após os ensaios o reboco é retirado e é avaliado o grau de danos ocorridos em todos os muretes, sendo que é avaliado: número de fissuras, espessura das fissuras, localização das fissuras, perda de secção e tipo de rotura (fig.55, 56 e 57).



Figura 55 - Fissuração e perda de secção no murete V



Figura 56 - Fissuração e perda de secção no murete VI



Figura 57 - Fissuração e perda de secção do murete VII

O processo de reabilitação dos muretes pode ser dividido em três passos:

1. Limpeza das fissuras e remoção de argamassas ou seções soltas;
2. Aplicação de calda de injeção, preparação e execução;
3. Reposição de seções;
4. Aplicação de rebocos;

O primeiro, o segundo e o terceiro passo é realizado da mesma forma nos 3 muretes o quarto é diferente em todos eles. O murete VII foi rebocado com cal aérea de traço 2:1, o murete V foi rebocado com cal hidráulica NHL 3.5 (2:1) e o murete VI antes de ser rebocado com NHL 3.5 (2:1) foi reforçado utilizando uma rede de vedações. O murete III é o murete de referência ou de controle deste ensaio piloto de reabilitação estrutural.

A **limpeza de fissuras** foi executada utilizando aspirador e peças metálicas longas com espessuras muito reduzidas, a limpeza foi executada de forma bastante cuidadosa para não aumentar a espessura das fissuras nem existir mais perdas de seção.

De seguida as fissuras foram preparadas para receberem a calda de injeção. Foram aplicadas mangueiras plásticas, com cerca de 10 cm de comprimento e 0.5 cm de diâmetro, de 10 em 10 cm ao longo de todas as fissuras, concluída a colocação de mangueiras as fissuras são seladas com silicone. O silicone deve ter um dia de cura.



Figura 58 – Fenda selada (a esquerda) e fenda não selada (a direita)

Com as fissuras seladas e o silicone seco procede-se a introdução de água e ar nas fissuras. A introdução de água, deve ser feita em grande quantidade, nas fissuras além de melhorar a aderência do adobe permite verificar se existe ligação entre fissuras, a introdução de água pode ser realizada com seringa ou com um funil. Após a injeção de água nas fissuras foi injetado ar comprimido com o intuito de expelir material que possa ter ficado dentro das fissuras ou que tenha sido solto pela passagem de água (fig. 59)



Figura 59 – Introdução de água e ar comprimido nos muretes

A **calda injetada** foi a **NHL6030S10 II**. Para a aplicação da mesma foram utilizados tubos de silicone vazios e pistola de silicone. A calda era realizada na hora e introduzida nos tubos de silicone, os tubos eram colocados na pistola de silicone e a injeção iniciava-se. A injeção era efetuada de baixo para cima, assim, quando a mangueira enchia sabia-se que daquele ponto para baixo a fissura estava preenchida. O processo era realizado de forma célere para aproveitar a fluidez inicial das caldas, a pressão introduzida no sistema não foi calculada dado que era realizada de forma manual (fig.60).



Figura 60 – Injeção de calda nos muretes

A reposição de seções foi executada com a argamassa NHL80/20 com 0.5% de superplastificante e 0.3% de fibras. Após os ensaios de compressão e ao longo do processo de limpeza foram preservadas seções de adobe soltas. Todas essas seções foram repostas. Inicialmente foram molhadas todas as zonas de onde as seções saíram, de seguida procede-se a colocação e fixação das mesmas recorrendo a grampos metálicos e a tábuas de madeira. Após estarem fixas é introduzida argamassa de forma a reconcertar os muretes (fig. 61).



Figura 61 – Reposição de seções

A aplicação de rebocos diferiu nos três muretes, no murete V e VI foram aplicados traços 2:1, no I de cal hidráulica e no VII de cal aérea (o de referência). O processo de aplicação de reboco nestes foi idêntico ao da realização dos muretes. No murete VI foi aplicada rede de vedações com vista ao reforço estrutural. A rede foi aplicada á volta de todas as faces laterais e foi fixada o mais esticada possível, utilizando pregos de fixação e posteriormente foi aplicada no topo do murete e fixada da mesma forma (fig. 62). Os muretes voltaram a ser ensaiados á compressão, como descrito anteriormente.



Figura 62 – a) Aplicação de rede nas faces laterais; b) Pregagem da rede; c) Aplicação da rede no topo

4.2 - Resultados e Discussão

4.2.1 - Soluções para a ascensão capilar

Na ascensão capilar foram aplicadas exclusivamente argamassas de reabilitação nas juntas (refechamento) entre os adobes. A avaliação da trabalhabilidade e da compacidade foi realizada para todas as amostras. A avaliação da compacidade baseou-se nos resultados da densidade e resistência mecânica obtidos (tab. 7).

Tabela 7 - Trabalhabilidade e compacidade em amostras de argamassas

	% de água	Segregação de grossos	Slump	Densidade aparente	Flexão	Compressão
					Tensão N/mm ²	Tensão N/mm ²
NHL 90 10	16	Não	120	1.76	1.18	2.16
NHL 85 15	16	Não	122	1.74	1.14	2.37
NHL 80 20	16	Não	128	1.77	1.10	2.41
NHL 70 30	16	Sim	127	1.86	1.10	2.52
NHL 50 50	16	Sim	140	1.79	1.32	2.59
NHL 30 70	16	Sim	145	1.87	1.33	2.91
NHL 10 90	16	Sim	160	1.87	1.52	3.28

A argamassa NHL 80/20 foi a que apresentou resultados mais satisfatórios, tanto na trabalhabilidade como na compacidade. É a argamassa que apresenta maior trabalhabilidade, densidade e resistência à compressão. Como tal foi a escolhida para os ensaios laboratoriais seguintes.

Definidas as proporções dos agregados finos e grossos, procedeu-se à introdução de superplastificante na argamassa e foi avaliada a relação água/trabalhabilidade da argamassa com superplastificante. Foi possível nas formulações reduzir o teor de água de 16% para 11.5-12% com 0.5% de SP (tab. 8).

Foi depois estudada a adição de fibras às argamassas com o intuito de melhorar o coeficiente de capilaridade. A tabela 9 mostra os valores de trabalhabilidade para um conjunto de formulações.

Tabela 8 - Diminuição da quantidade de água com recurso a superplastificante

	% água	SP (%)	Slump
NHL80/20	11	0.5	<110
NHL80/20	11.5	0.5	140
NHL80/20	12	0.1	<110
NHL80/20	12	0.2	<110
NHL80/20	12	0.3	188/119
NHL80/20	12	0.4	148/149
NHL80/20	12	0.5	168/169

Tabela 9 - Trabalhabilidade com introdução de fibras

	% água	Segregação de grossos	Slump
NHL80/20 0.5% S.P 0.2 %F	13.5	Não ocorre	160
NHL 80/20 0.5% S.P 0.3 % F	14	Não ocorre	158
NHL 80/20 0.5% S. P 0.4 %F	14.5	Não ocorre	160
NHL 80/20 0.5% S.P 0.5 %F	15	Não ocorre	150

Além da trabalhabilidade, as argamassas com fibras foram sujeitas a ensaios no estado endurecido de forma a determinar qual seria a apresentava melhor compacidade (tab. 10). Embora fosse possível introduzir até 0.5% de fibras sem diminuir muito a trabalhabilidade, a amostra com 0.3% de fibras foi a que demonstrou melhor compacidade.

Tabela 10 - Densidade e resistência mecânica das fibras

	Densidade	Flexão Máx_ Tensão N/mm ²	Compressão Máx_ Tensão N/mm ²
	-		
NHL 80/20 0.5% S.P 0.2 %F	1.65	1.96	3.99
NHL 80/20 0.5% S.P 0.3 % F	1.74	2	4.18
NHL 80/20 0.5% S.P 0.4 %F	1.64	1.64	3.39
NHL 80/20 0.5% S.P 0.5 %F	1.69	1.59	3.33

Além dos ensaios expostos neste estudo de soluções de ascensão capilar, foram ainda testados os coeficientes de capilaridade e a porosidade aberta do próprio adobe e da argamassa de referência de cal aérea com traço 3:1. A figura 63 mostra a relação entre os coeficientes de capilaridade das amostras estudadas. Como é possível observar a cal hidráulica possui um coeficiente de capilaridade mais baixo que o adobe e a cal aérea.

Quando é adicionado superplastificante a cal hidráulica este valor desce ainda mais, no entanto a adição de fibras não acrescenta qualquer melhoria no coeficiente de capilaridade neste ultimo caso. Os valores apresentados, também na tabela 11, são valores médios de todas as amostras em estudo.

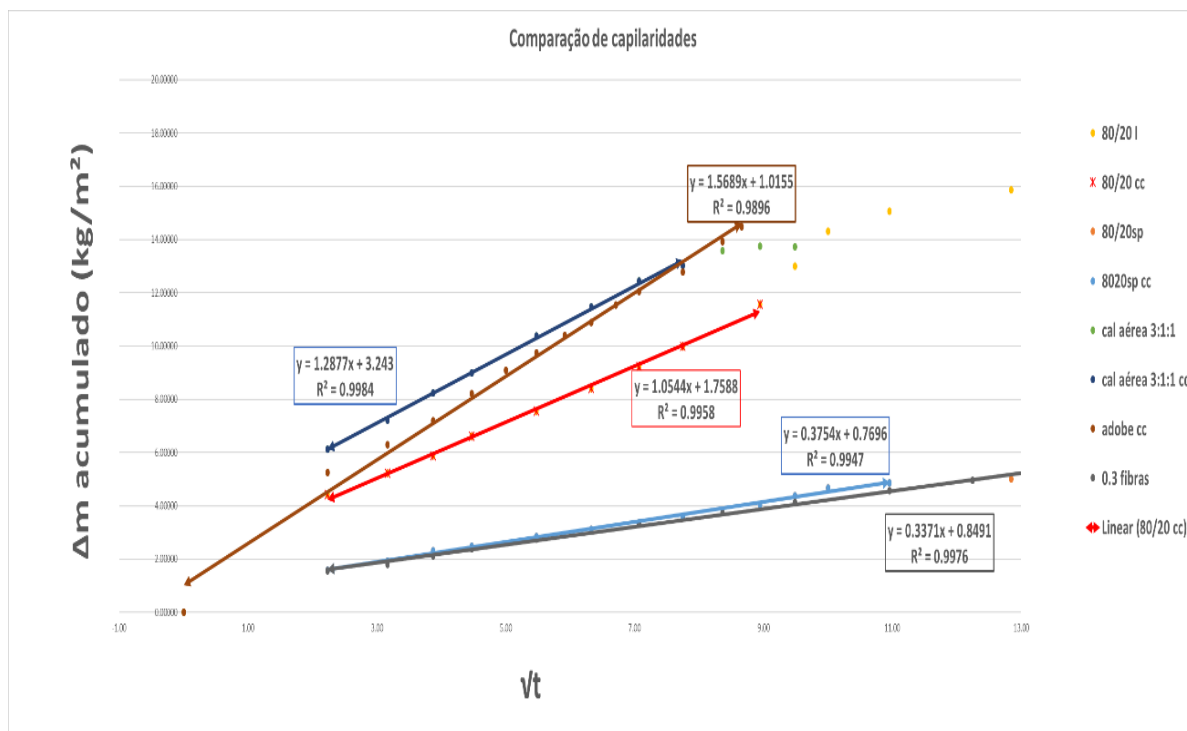


Figura 63 - Comparação de capilaridades das argamassas desenvolvidas

Complementando o coeficiente de capilaridade foi também calculado o índice de porosidade aberta e, a tabela 11 sintetiza os valores de porosidade aberta e coeficientes de capilaridade das argamassas estudadas, da argamassa de traço 3:1 aérea e do adobe

Tabela 11 - Coeficiente de capilaridade e porosidade aberta

	NHL 80/20	NHL 80/20 0.5SP	NHL 80/20 0.5SP 0.3F	Cal aérea 3:1	Adobe
Coeficiente de capilaridade	1.05	0.3	0.33	1.33	1.57
Porosidade aberta (%)	16.4	18.4	17.98	19.9	18.44

Também foi determinado o módulo de elasticidade através do PUNDIT para todas as argamassas, a fim de avaliar a compatibilidade entre os materiais (tab. 12).

Tabela 12 - Módulos de elasticidade

	NHL80/20	80/20 0.5SP	80/20 0.5SP 0.3F%	Cal aérea 3:1	Adobe
Ed	9.77	10.85	11.88	4.23	3.49

Com base nestes resultados no laboratório, selecionou-se para os ensaios piloto da ascensão capilar nos muretes, a argamassa de cal aérea 3:1 (referência) e as argamassas de cal hidráulica, NHL80/20 e NHL80/20 0.5SP. A argamassa de cal aérea serviu de controlo ao ensaio enquanto as restantes caldas foram escolhidas por apresentarem coeficientes de capilaridade baixos e módulos de elasticidade e porosidade compatíveis.

O murete I foi testado com argamassa de cal aérea 3:1 e o seu ensaio durou 7 dias (fig. 64) pois ao fim deste tempo o murete estava saturado.

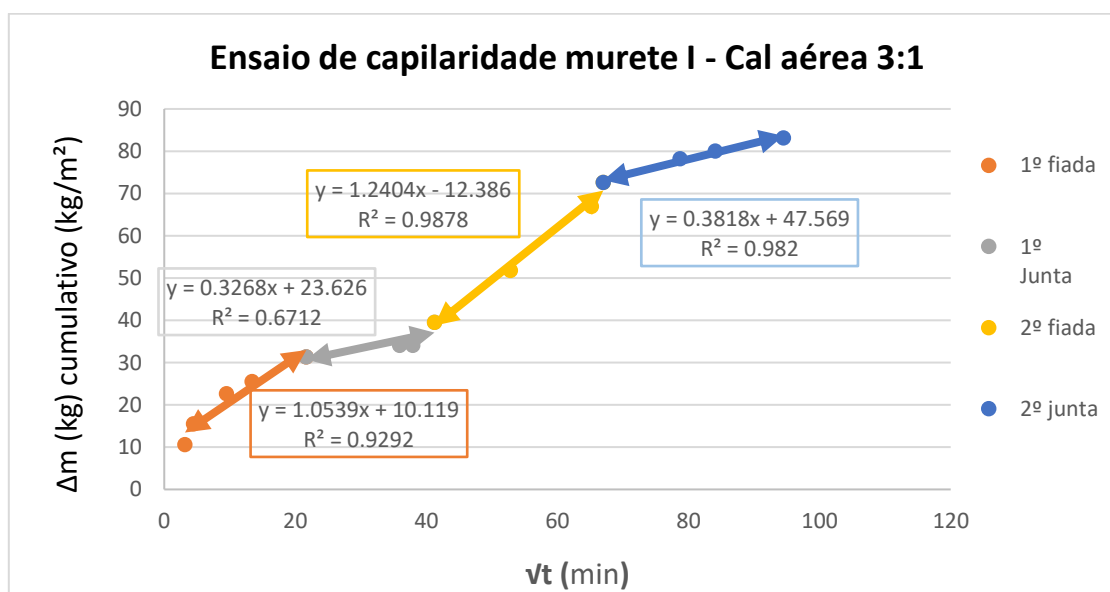


Figura 64 - Absorção de água pelo murete I ao longo do tempo

Os resultados dos ensaios de absorção de água dos muretes II e III duraram 10 dias, sem saturação total, estando os resultados obtidos apresentados nas figuras 65 e 66.

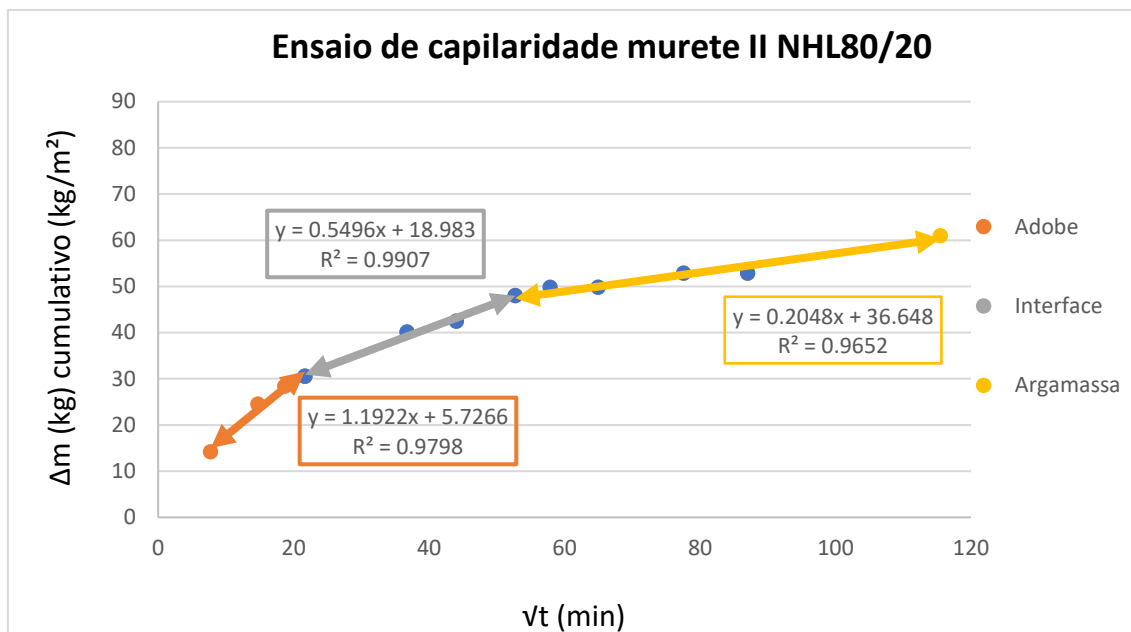


Figura 65 - Absorção de água pelo murete II ao longo do tempo (com argamassa de cal hidráulica NHL80/20)

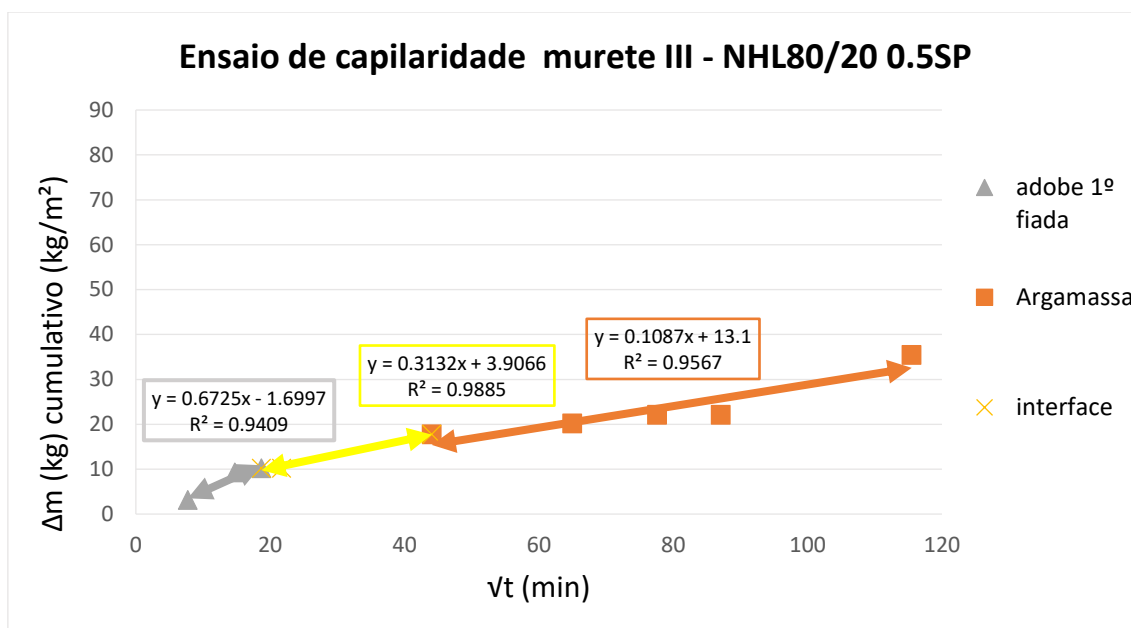


Figura 66 - Absorção de água ao longo do tempo pelo murete III tempo (com argamassa de cal hidráulica NHL80/20 0.5SP)

Através dos gráficos é possível aferir a capacidade de cada uma das argamassas em impedir a ascensão de água e retirar os coeficientes de capilaridade das mesmas quando aplicadas nos muretes. Deve-se notar a interface que existe entre o adobe e as argamassas de cal hidráulica aquando da passagem de água, é clara a descida do

coeficiente de capilaridade, contudo este ainda não estabilizou e desce ainda mais quando encontra a argamassa. A tabela 13 compara estes coeficientes de capilaridade obtidos em cada um dos muretes:

Tabela 13 - Coeficiente de capilaridade retirados dos ensaios dos muretes I, II e III

	Zona	C.C
Murete I	1ª fiada	1.05
	Junta	0.33
	2ª fiada	1.24
	Junta	0.38
Murete II	Adobe	1.19
	Interface	0.55
	NHL80/20	0.2
Murete III	Adobe	0.67
	Interface	0.31
	NHL80/20 0.5SP	0.11

Na figura 67 mostra-se a variação de absorções entre os três muretes.

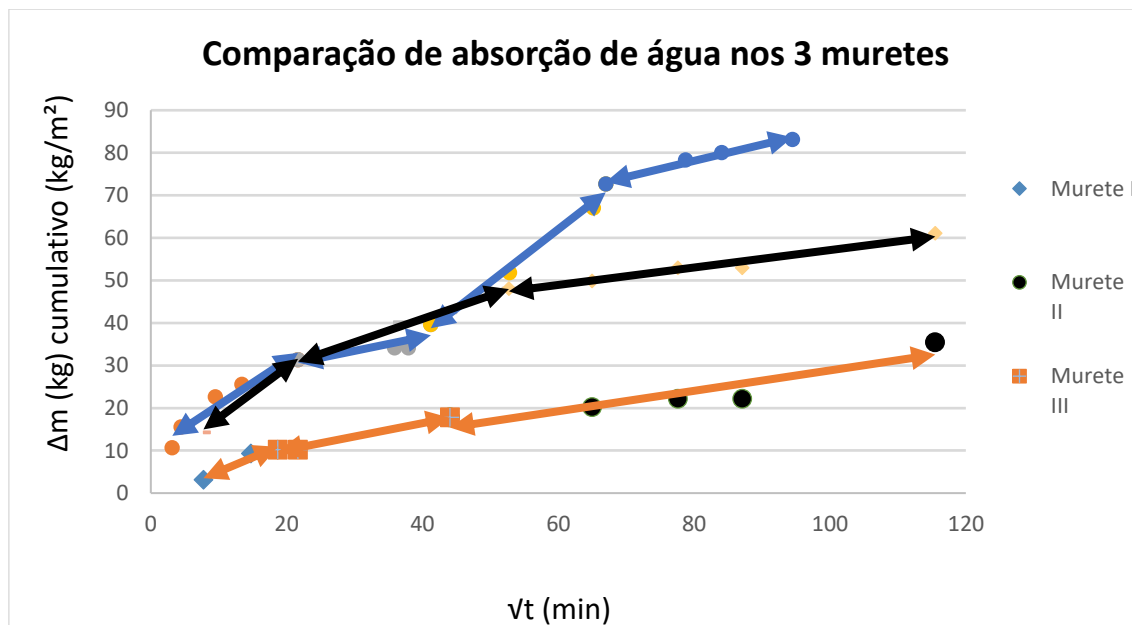


Figura 67 - Comparação de absorção de água ao longo do tempo dos três muretes

Através da figura 67 é possível constatar que o murete que possui juntas de cal aérea é o que absorve mais água permitindo a ascensão capilar em todo o murete em apenas 7

dias. Por outro lado, constata-se já com estes resultados o corte hídrico providenciado pelas 2 argamassas de cal hidráulica (muretes II e III), patente nos menores coeficientes de capilaridade e pelo facto de após 10 dias ainda a água não ultrapassou a 1ª fiada de argamassa de junta. De facto, o murete I foi o que absorveu mais água, 83.1 kg/m². O murete II absorveu cerca 61 kg/m² e o murete III absorveu 48.2 kg/m². A solução aplicada no murete IV não foi capaz de impedir a ascensão da água mas retardou a mesma em relação ao murete de referência (murete I).

A comparação de altura de água ao longo do tempo está patente na fig. 68 nos quatro muretes. Destaca-se que ao fim de 7 dias apenas o murete I viu saturada as três fiadas de adobe (C) enquanto o murete IV ao fim desse tempo ainda só tem saturado 2 fiadas (B). Os muretes II e III com argamassas de junta de cal hidráulica mesmo após 14 dias ainda a saturação se encontra na primeira fiada (A), não ultrapassando a água a primeira junta por ascensão capilar.

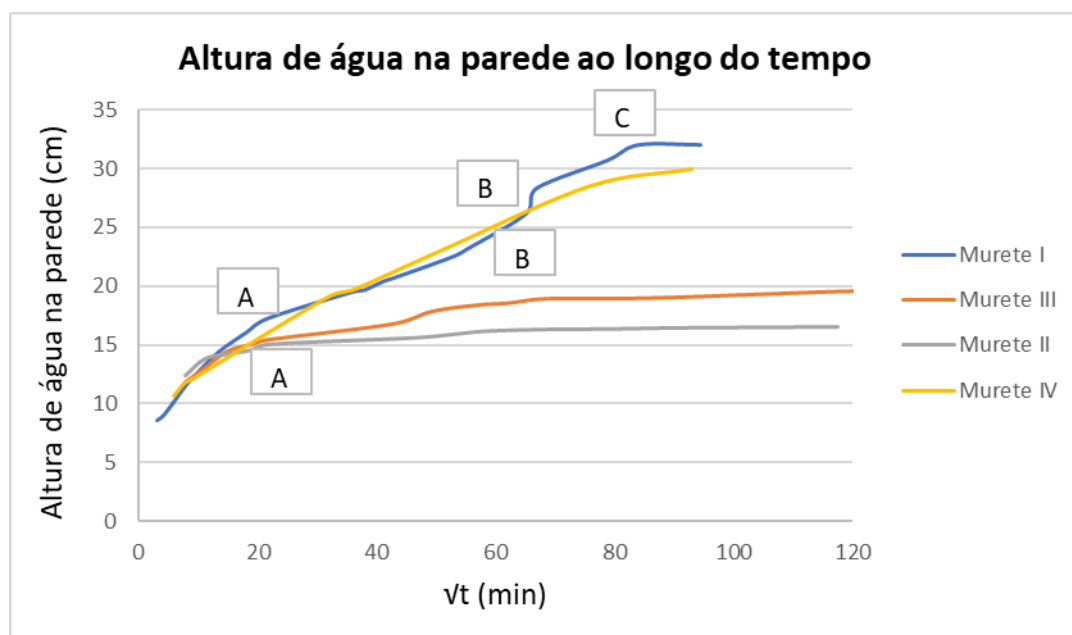


Figura 68 - Variação de altura de água nos muretes ao longo do tempo; Tempo para saturação do adobe nos muretes (I a IV): primeira fiada (A); segunda fiada (B); terceira fiada (C).

A confirmação experimental do corte hídrico é patente através da avaliação da altura de água (figura 68 a 72) onde é possível constatar que no murete I a água alcançou a última fiada de adobes, saturando todas as fiadas incluindo as duas juntas de cal aérea (3:1), pelo que a mesma demonstra incapacidade em conter a capilaridade ascensional. No

murete II e III a água não passou da primeira junta, provando a eficácia de ambas as argamassas no corte hídrico. No entanto através da análise de resultados também é possível constatar que a argamassa NHL80/20 0.5SP possui o coeficiente de capilaridade mais baixo (0.11) que a NHL80/20 (0.20) e a de cal aérea. De facto, a utilização de superplastificante, com redução do teor de água, provou ser bastante eficaz.

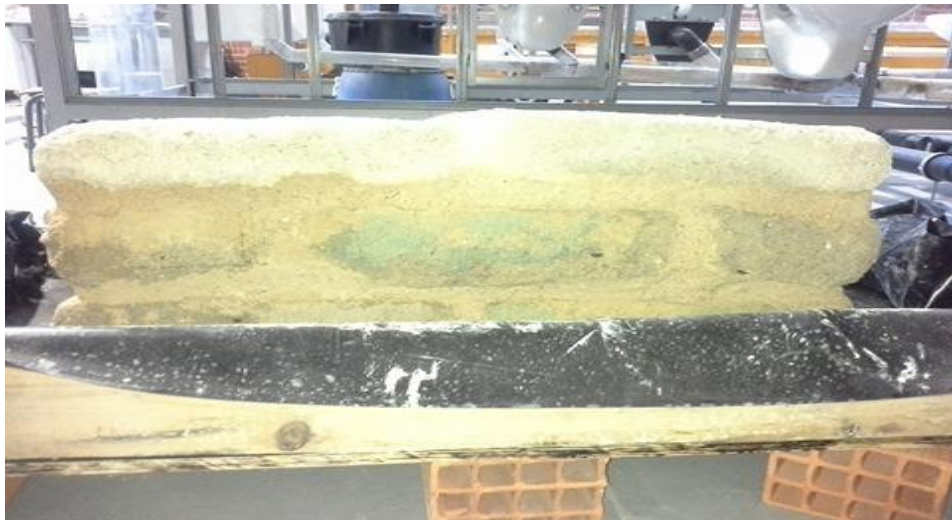


Figura 69 – Murete I ao fim de 7 dias

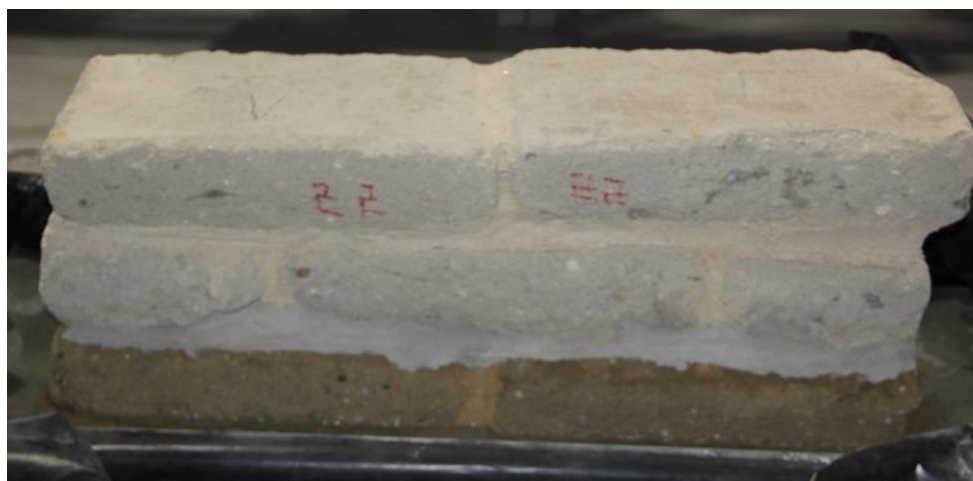


Figura 70 -Murete II ao fim de 7 dias

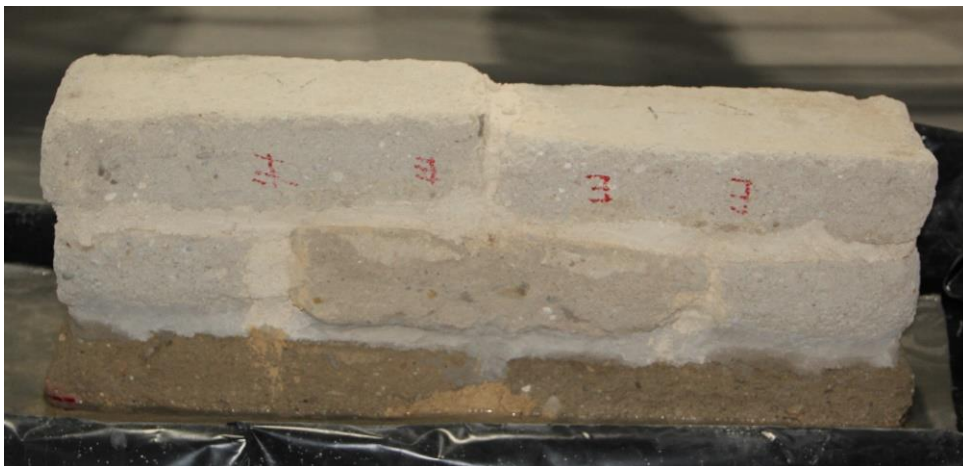


Figura 71 – Murete III ao fim de 7 dias



Figura 72 – Murete IV ao fim de 7 dias

A solução proposta, com a introdução intercalada de cal hidráulica (fig. 72), demonstrou ser capaz de retardar a ascensão da água na parede, “obrigando” a água apenas a subir pela cal aérea, contornando a argamassa de cal hidráulica inserida alternadamente no murete IV. Em relação à compatibilidade e aderência ambas as argamassas de cal hidráulica demonstraram um bom comportamento e desempenho.

4.2.2 - Soluções para reforço de danos estruturais

Para a resolução ou reforço de danos estruturais foram aplicadas caldas de injeção juntamente com argamassas de reabilitação em muretes previamente fissurados. As caldas foram selecionadas tendo em conta primeiramente a sua fluidez (tabela 14).

Tabela 14 - *Fluidez das caldas de injeção desenvolvidas*

Amostra	Fluidez (segundos)
NHL5050	450
NHL5545	375
NHL5545I	<600
NHL5545II	<600
NHL6035S5	29
NHL6035S5 I	33
NHL6035S5II	36
NHL6035S5 III	185
NHL6030S10	26
NHL6030S10 I	30
NHL6030S10 II	33
NHL6030S10 III	49

Após a análise de fluidez verificou-se que as caldas que contém fibras e farinha de sílica mantêm mesmo assim bons índices de fluidez, pelo que se procedeu também à avaliação da densidade e resistência mecânica das mesmas (tabela.15) pois foram destas que se escolheu a utilizar nos muretes:

Tabela 15 - *Resistência mecânica, densidade e módulo de elasticidade das caldas com fibras*

	Flexão	Compressão		
	Tensão de rotura	Tensão de rotura	Densidade	E_d
Formulação	(N/mm²)	(N/mm²)		(GPa)
NHL6035S5 I	2.00	5.94	1.65	9.87
NHL6035S5 II	2.33	5.32	1.66	9.31
NHL6035S5 III	1.34	6.13	1.67	9.43
NHL6030S10 I	1.60	2.65	1.62	7.27
NHL6030S10 II	1.82	5.54	1.71	9.89
NHL6030S10 III	0.78	5.40	1.71	10.08

Devido a conjunto de características referidas acima a calda aplicada nos muretes foi a NHL6030S10II. Este tem na sua constituição 60% de cal hidráulica, 30% de finos (areia de Vale de Ílhavo), 10% de farinha de sílica SS160, 0.2% de fibras e 0.5% de superplastificante.

As argamassas de reposição de partes de adobe nos muretes, previamente partidos, foram a argamassa NHL80/20 com 0.5 SP e 0.3% de fibras (tab. 10). Por outro lado, as argamassas de reboco testadas no ensaio de reabilitação dos muretes de adobe diferem das tradicionais no traço. Foram assim realizadas e avaliadas estas duas argamassas, uma de cal aérea (murete VII) e outra de cal hidráulica (muretes V e VI), ambas com traço 2:1, para além do próprio adobe dos muretes (tabela 16):

Tabela 16 - Características do adobe e das argamassas de reboco usadas na reconstituição dos muretes

	Flexão	Compressão	Módulo de elasticidade	Densidade
	Máx_Tensão	Máx_Tensão	Ed	D
	N/mm²	N/mm²	(Gpa)	g/cm³
Cal aérea 21	0.78	1.70	8.85	1.94
Cal hidráulica 21	1.15	32.88	9.72	1.84
Adobe	-	0.98	3.50	1.82

Antes de rebocar o murete V foi reabilitado com a calda de injeção escolhida NHL6030S10II, a argamassa de reposição NHL80/20 com 0.5% de S.P e 0.3% e ainda a argamassa de reboco (cal hidráulica 21). O murete VI foi reabilitado com calda de injeção NHL6030S10II, argamassa de reposição NHL80/20 0.5%SP e 0.3% de fibras e reforçado ainda com uma rede plástica (rede Cintoflex preta ref^a S19 MT)) sendo o murete VII (o murete de referência) foi reabilitado apenas com calda de injeção NHL6030S10II e argamassa de reboco de cal aérea 2:1.

As figuras 73, 74 e 75 ilustram a relação força-deslocamento dos três muretes nos dois ensaios a que os mesmos foram sujeitos. No murete V conseguiu-se recuperar cerca de 78% da sua capacidade resistente à compressão original (121 kN vs 154 kN), sendo que a rotura se deu com um comportamento parecido ao 1º ensaio. Após a reabilitação realizada, o murete VI suportou uma força máxima de rutura de 188 kN superando em larga margem os 121 kN do primeiro ensaio. A rede mostrou-se assim um complemento de interesse, complementando o papel de reforço da calda de injeção e as argamassas.

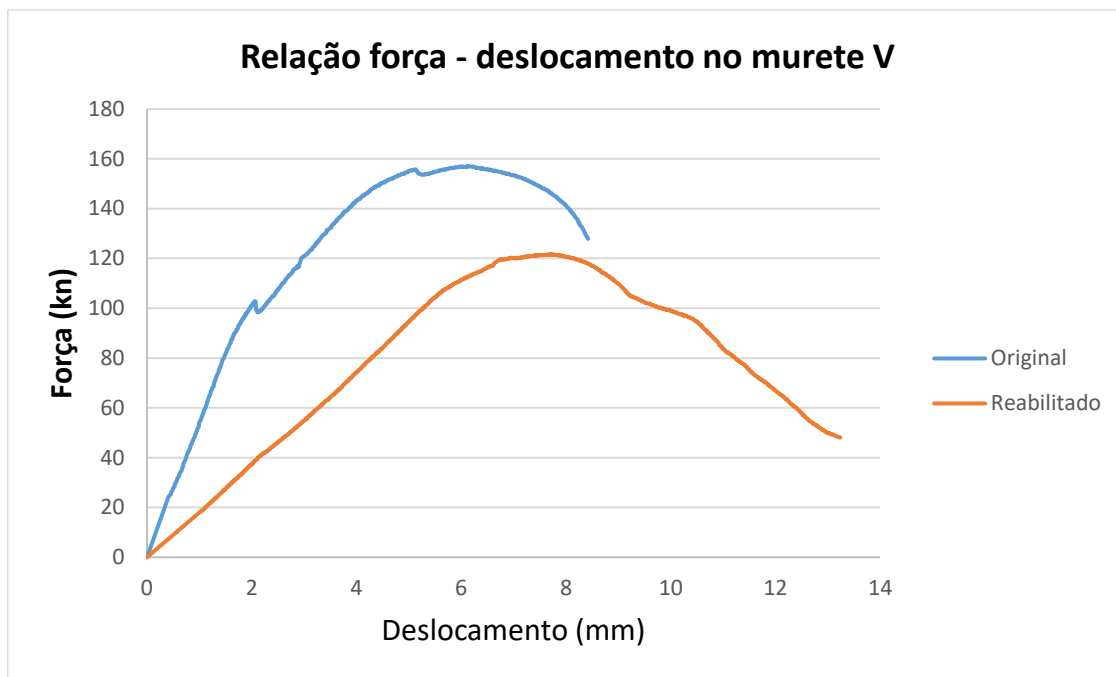


Figura 73 - Relação força deslocamento nos ensaios do murete V

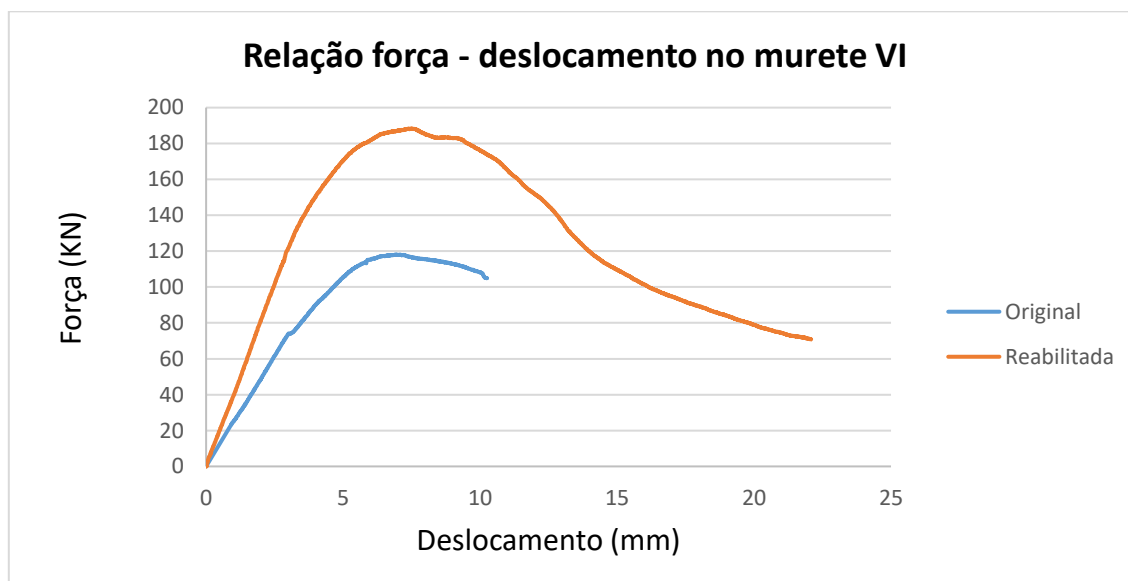


Figura 74 - Relação força – deslocamento no murete VI

Em relação ao murete VII de referência foi possível recuperar 94% da capacidade resistente inicial, embora, em termos absolutos o murete V e VI apresentam valores superiores a este murete de referência. Por exemplo, após a reabilitação, o murete VI, rebocado com cal hidráulica 21, suportou uma força máxima de 121 kN enquanto o murete VII, apesar de ter recuperado 94%, suportou uma força máxima de apenas 71 kN

na rutura. No que toca ao murete VI, comparado com o murete V, a aplicação da rede permitiu ainda um incremento muito significativo, mostrando-se uma solução complementar as caldas de injeção.

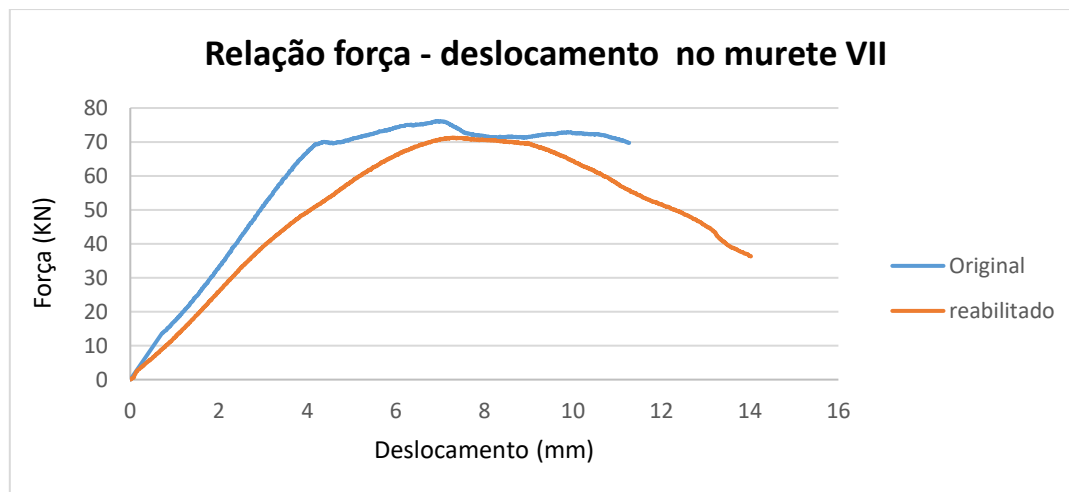


Figura 75 - Relação força-deslocamento no murete VII

Foi ainda possível calcular os módulos de elasticidade das paredes, a tensão máxima, e o módulo de elasticidade máximo a partir dos extensores colocados nos muretes. As figuras 76 a 78 ilustram os gráficos utilizados para calcular os parâmetros mencionados.

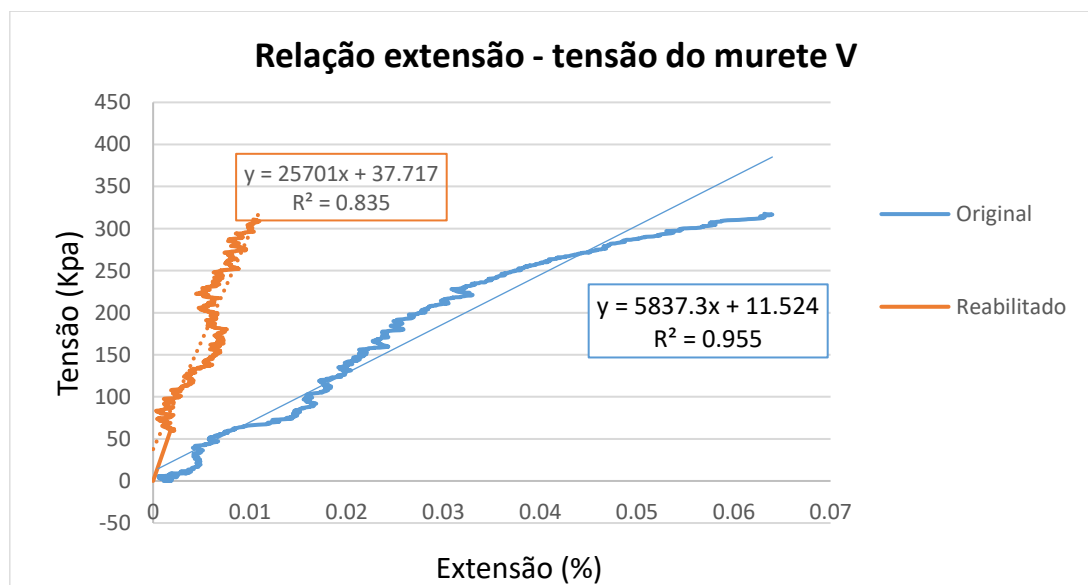


Figura 76 - Relação tensão-extensão no murete V antes e após a reabilitação

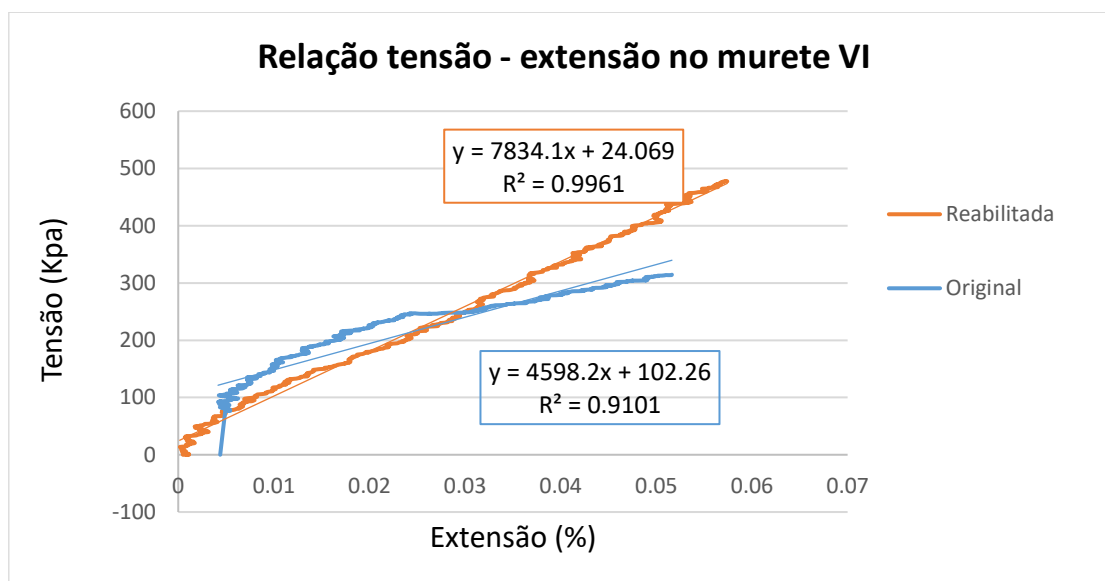


Figura 77 - Relação tensão-extensão no murete VI antes e após a reabilitação

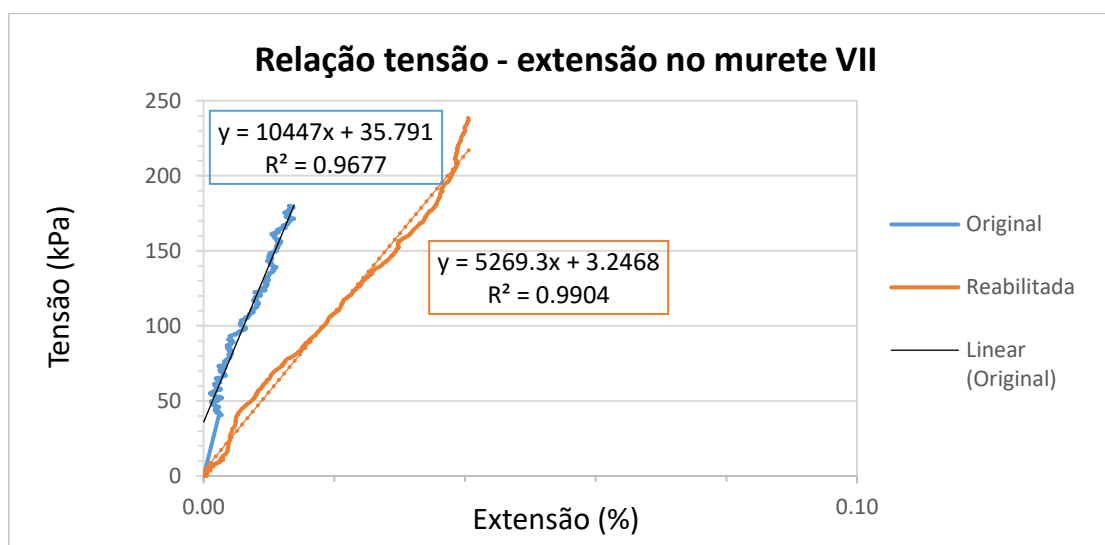


Figura 78 - Relação tensão-extensão no murete VII antes e após a reabilitação

A tabela 17 mostra os valores de módulo de elasticidade, tensão e extensão máxima retirados dos valores das figuras 76 a 78. No murete V, no que diz respeito a relação do módulo de elasticidade antes e depois da reabilitação verifica-se um aumento neste módulo, no entanto, apenas a aplicação de argamassa de cal hidráulica como reboco não justifica este comportamento, podendo ele estar relacionado com o modo de rotura no que concerne à extensão e orientação das fissuras no murete. De facto, verificou-se

neste murete em relação aos outros dois que apresentou após reabilitação uma fissuração transversal ao murete ao contrário dos outros dois muretes cujas fissuras se desenvolveram longitudinalmente no murete.

Tabela 17 - Módulos de elasticidade ao longo dos ensaios em todos os muretes

	Estado	E (kPa)	$\sigma_{\text{máx}}$ (kPa)	$\epsilon_{\text{máx}}$
Murete I	Original	5837	313.69	0.0629
	Reabilitada	25071	310.54	0.0103
Murete II	Original	4598	314.99	0.0512
	Reabilitada	7834	477.34	0.0574
Murete III	Original	10047	181.29	0.0168
	Reabilitada	5262	313.17	0.0356

No murete VI o módulo de elasticidade também aumentou conferindo maior rigidez à estrutura, fruto da aplicação da rede. Tal como o murete V, este não revelou qualquer tipo de incompatibilidade com a cal hidráulica. Mesmo o valor da tensão máxima, que diminui nos muretes V e VII após a reabilitação, apresenta no murete VI um aumento, confirmando o papel auxiliar da rede no reforço atrás referido.

Finalmente, o módulo de elasticidade, no caso do murete de referência VII, diminui no ensaio após a reabilitação uma vez que neste murete não foi aplicada nenhuma argamassa de reabilitação específica como nos outros dois casos nem a rede de reforço.

No que toca a calda de injeção introduzida nos muretes V a VII foi possível verificar após a rutura do segundo ensaio (após reabilitação) que a calda mostrou boa aderência e resistência ao suporte. Foi possível verificar que as fissuras no segundo ensaio não se deram pela calda e abriram em outras zonas do murete, o que também indicia que as caldas apresentavam uma boa fluidez quando da sua injeção (fig. 79).



Figura 79 - Murete VII após o ensaio de rutura e um exemplo de fissura no adobe preenchida com calda de injeção

5 - Conclusões

No que diz respeito à solução de reabilitação de paredes em adobe relativamente à ascensão capilar, ambas as argamassas dimensionadas baseadas em cal hidráulica (aplicadas nos muretes II e III), apresentaram respostas positivas na prevenção e controlo da capilaridade ascensional no adobe. Quanto à compatibilidade com o adobe houve uma boa reação com a introdução destas argamassas de cal hidráulica, uma vez que os módulos de elasticidade de ambos não são muito diferentes. Nestas argamassas, a adição de superplastificante parece ser uma solução eficaz para a redução do teor de água de amassadura e consequente diminuição no coeficiente de capilaridade. A adição de fibras nada acrescentou na prevenção da capilaridade ascensional em relação a estas argamassas de cal hidráulica com superplastificante.

A solução de reabilitação proposta de junta alternada (murete IV) não teve tanta eficácia como a verificada nos muretes II e III que contribuíram para um efetivo corte hídrico. No entanto, aquela solução demonstrou ter maior resistência à ascensão capilar da água do que o murete de referência I de cal aérea, pelo que deve ter sido em conta em estudos futuros.

Nas soluções de reforço estrutural as caldas de injeção e as argamassas desenvolvidas permitiram combinadamente repor a capacidade resistente inicial dos muretes nos quais foram aplicadas. A junção da rede de reforço na solução de reabilitação não só repôs como melhorou ainda de forma significativa a capacidade resistente do murete conferindo maior rigidez, visível pelo aumento do módulo de elasticidade. Tendo em conta o conhecimento atual sobre caldas de injeção o reforço com rede parece ser a melhor solução complementar para a recuperação de paredes de adobe.

Nas argamassas de reboco usadas nos muretes, o traço 2:1 de cal hidráulica provou ser mais eficaz que o traço 2:1 de cal aérea. Embora no murete onde estava rebocado com cal aérea ter recuperado 94% da capacidade resistente inicial, a capacidade resistente no murete V e VI reabilitados foram superiores em termos absolutos em relação ao murete de referência VII, ou prova a mais-valia das soluções desenvolvidas para reforço a danos estruturais.

Nestes casos de reforço, a calda de injeção usada demonstrou resultados positivos, sobretudo na fluidez, aderência e resistência, embora em algumas fissuras se notasse que a penetração não foi total. Contudo, é de realçar que as paredes não fissurarem pelas

fissuras inicialmente induzidas, demonstrando a capacidade resistente da calda e sua boa injetabilidade.

Em termos de trabalho futuro, propõe-se continuar a desenvolver estudos de melhoria da injetabilidade das caldas de injeção pois se trata de um passo crítico na aplicação em paredes reais. Paralelamente, pode-se estudar outras soluções de reforço mecânico (pregagens) e aprofundar os estudos de comportamento mecânico.

Na solução desenvolvida para a ascensão capilar deve-se continuar com ensaios de maior duração para se poder estudar a reação destas argamassas de corte hídrico ao longo do tempo e sujeitas a soluções salinas.

6. - Bibliografia

Abrantes, V.; Mendes da Silva, J. (2007): Patologia em paredes de alvenaria: causas e soluções; Seminário sobre Paredes de Alvenaria, P.B. Lourenço et al. (eds.), 2007

AC1 Committee 544(1982): “Measurement of Fiber Reinforced Concrete Properties,” AC1 JOURNAL, Proceedings V. 79, Sept.-Oct., pp. 1-20. ((citado em Soroushian, P *et al* (1992))

Aedo, W.; Douline, A. (2011): Adobe, manual de produção. Aachen: Miseror/CRAterre, IHR Hilfswerk (citado no livro “O adobe”)

Alexandra, S. (2006): Arquitetura e Construção em Terra no Piauí: Investigação, Caracterização e Análise. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Piauí.

Alvarez, J.; Sequeira, C.; Costa, M. (2005): Ensinaamentos a retirar do Passado Histórico das Argamassas, 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa

Appleton, J. (2011): Reabilitação de Edifícios Antigos. Patologias e Tecnologias de Intervenção – 2ª Edição. Edições ORION.

Azeiteiro, et al, 2012: Caracterização reológica de caldas de injeção para consolidação de revestimentos, 4º Congresso português de argamassas e ETICS, Coimbra, 29 e 30 de março de 2012

Banfill, P. (2006): Rheology of Fresh Cement and Concrete, P. F. G. Banfill, Rheology Reviews 2006, pp 61 – 130, School of the Built Environment, Heriot-Watt University Edinburgh, EH14 4AS, UK

Baronio, G.; Binda, L. (1983): Durability of solid brick building structures, Recuperare (4): 136-141 (citado em Luso (2012))

Berge, B. (2009): The Ecology of Building Materials. 2º Edition, Architectural Press, ISBN 978-1-85617-537-1, Elsevier Science

Binda, L.; Modena, C.; Baronio, G. (1993): Strengthening of Masonries by Injection Technique, Proc. 6th NAMC (North American Masonry Conference), Philadelphia (citado em Luso (2012))

Binda, L; Modena, C; Baronio, G; Gelmi, A; (1994): Experimental Qualification of Injection Admixtures Used for Repair and Strengthening of Stone Masonry Walls, 10th IB2Mac, Calgary, Canada, 5 a 7 de Julho

Binda, L; Baronio, G.; Tiraboschi, C.; Tedeschi, C. (2003): Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto, Construction and Building Materials (17): 629-639

Binda, L; Saisi, A.; Tedeschi, C. (2006): Compatibility of materials used for repair of masonry buildings: research and applications, Fracture and Failure of Natural Building Stones- Applications in the Restoration of Ancient Monuments, Part I, Stavros k. Kourkoulis Editor, Elsevier

Botas, S.; Rato, V.; Faria, P (2011): Influência da quantidade de água de amassadura no comportamento aos ciclos gelo/degelo em argamassas de cal, SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas,

Callebaut, K.; Elsen, J.; Van Belen, K.; Viaene, W. (2001): "Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium) Natural hydraulic lime or cement?". In Cement and Concrete Research 31, 397-403.

Carvalho, J.; Pinto, J.; Varum H.; Jesus, A.; Lousada, J.; Morais, J. (2008): Estudo do Material Terra usado nas Construções em Tabique na Região de Trás-os-Montes e Alto Douro. Terra Brasil 2008, II Congresso de Arquitectura e Construção com Terra no Brasil. S. Luís, Maranhão, Brasil

Charola, A.; Henriques, F. (1999): Hydraulicity in lime mortars revisited. Paisley, Scotland, RILEM Publications, 1999. RILEM TC-167COM International Workshop, University of Paisley, May 1999.

Coelho, A.; Torgal, F.; Jalali; S. (2009): A Cal na Construção, TecMinho; ISBN 978-972-99179-8-1, Guimarães

Costa, A.; Varum, H.; Silveira, D.; Almeida, J. (2007): Avaliação da vulnerabilidade de construções existentes em adobe. Arte & construção, Engenharia sísmica.

Colleparidi, M. (1998): Admixtures Used to Enhance Placing Characteristics of Concrete, Cement and Concrete Composites 20, 103-112 0 1998 Elsevier Science Ltd

Comité Européen de Normalização (CEN) (2010 a): EN 998-1: Specification for Mortar for Masonry - Part 1: Rendering and Plastering Mortar". Bruxelas, Bélgica.

Comité Europeu de Normalização (CEN) (2010) b): EN 998-2: Specification for Mortar for Masonry - Part 2: Masonry Mortar. Bruxelas, Bélgica.

Comité Europeu de Normalização (CEN) (2010) c): EN 459-1: Building lime - Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria. Bruxelas, Bélgica.

Coutinho, A. (1997) a): Fabrico e Propriedades do Betão, Volume I, Ed. Laboratório Nacional Engenharia Civil, Lisboa. (Biblioteca)

Coutinho, A. (1997) b): Fabrico e Propriedades do Betão, Volume I, Ed. Laboratório Nacional Engenharia Civil, Lisboa. (Biblioteca)

Coutinho, J. (2006): Materiais de Construção 2. Ligantes e caldas. Departamento de engenharia civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

De Schutter, G.; Poppe, A. (2004): Quantification of the water demand of sand in mortar, Construction and Building Materials 18, pg. 517–521

Duarte, C. (2009): Tema 3: Argamassas de Reboco e Monomassas (EN 998-1), Monografias APFAC sobre Argamassas de construção.

Elert, K.; Navarro-Rodriguez, C.; Pardo, E.; Hansen, E.; Cazalla, O. (2002): Lime Mortars for the Conservation of Historic Buildings, Studies in Conservation, 47:1, 62-75,

EMOdicO (2001): Dicionário técnico, 3ª Ed. European Mortar Industry Organisation.

Faria, P.; Henriques, F. (2006): Subprodutos industriais como componentes pozolânicos em argamassas de cal aérea, PATORREB 2006 - 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, FEUP, Porto, p. 295-305

Faria, P. (2012): argamassas sustentáveis, II CRSEEL – Conferência de Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono. FCT/UNL, 26-27 abril

Figueiredo, A.; Varum, H; Costa, A.; Silveira, D.; Oliveira, C. (2012): Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall, Materials and Structures DOI 10.1617/s11527-012-9895-1

Fortes-Revilla, C.; Martinez-Ramirez, S.; Blanco-Varela, M. (2006): Modelling of slaked lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables, Cement & Concrete Composites (28):458-467

- Golaszewski, J (2012):** Influence of cement properties on new generation superplasticizers performance, *Construction and Building Materials*, 35, 586-596
- Hanehara, S., Yamada, K. (2008):** Rheology and early age properties of cement systems. *Cement and Concrete Research*, Vol.21, págs. 171-195. Elsevier
- Hanley, R.e Pavia, S. (2007):** A study of the workability of natural hydraulic lime mortars and its influence on strength, *Materials and Structures* DOI 10.1617/s11527-007-9250-0
- Hendrickx, R., Minet, J., Van Balen, K., Van Gemert, D. (2008):** Workability of mortars with building lime: assessment by a panel of masons versus lab testing. *Proc. 14th International Brick and Block Masonry Conference*. Orlando Florida, February 17-20
- Helfritz, H. (1937):** Land without Shade. *Journal of the Royal Central Asian Society* 24 (2) 201–16. (Citado de Minke 2006)
- Henriques, F. (2005):** Challenges and Perspectives of Replacement Mortars in Architectural Conservation, Workshop RILEM, Delft, University of Delft, Janeiro
- Hewlett, P. (2001):** Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition, Ed. ButterworthHeinemann, Oxford.
- Hiemenz, P.; Rajagopalan, R. (1997):** Principles of colloid and surface chemistry, Third Edition, revisited and expanded Ed. Marcel Dekker Inc., (download)
- Hoang, Q.; Kaci, A.; El-Hadj Kadri, Gallias, J.L (2015):** A new methodology for characterizing segregation of cement grouts during rheological tests, *Construction and Building Materials* 96 pag.119–126, Elsevier
- Houben, H.; Guillaud, H. (1984):** 20 Earth Construction, Primer Brusscls, CRATerreYPGCJCRA/ UNCHS'AGCD. (citado em Minke (2006))
- Houben, H. ; Guillaud, H. (1989) :** Adobe/Terre Moulée. *Traité de construction en terre*, 1^o edition. Marseille : E.d Parenthèses, (citado em “O adobe”)
- Houben H. ; Guillaud H. (2008) :** Earth Construction : A Comprehensive Guide. CRATerre – EAG, Intermediate Technology Publication, London, United Kingdom
- Hughes, B. (1976) :** Limit State Theoryfor Reinforced Concrete Design Van Nostrand Reinhold Co., New York, (citado em Soroushian, P *et al* (1992))

Ignoul, S.; Van Rickstal, F.; Van Cemert, D. (2005): Application of mineral grouts. Case study and impact on structural behaviour: Church of St. Catharina at Duisburg
Strutural Anatysis of Historical Constructions, Modena, Lourenço & Roca (eds), London

Illampas, R, Silva, R, Charmpis, D., Lourenço, P., Ioannou, I. (2017): Validation of the repair effectiveness of clay-based grout injections by lateral load testing of an adobe model building, *Construction and Building Materials* 153, 174–184

IPQ, NP EN 934-2 (2009): Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem. Instituto Português da Qualidade.

Isfelda, A; Moradabadib, E; Laeferb,D.F; Shrivea,N.G.(2016): Uncertainty analysis of the effect of grout injection on the deformation of multi-wythe stone masonry walls, *Construction and Building Materials*, Volume 126, Pages 661–672

Izaguirre A.; Lanas, J.; Alvarez, J. (2011): Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars, *Construction and Building Materials* 25 992–1000

Jäger W., Fuchs C. (2008): Reconstruction of the Sistani House at Bam Citadel after the collapse due to the earthquake 2003. In proc. of VI International Conference on Structural Analysis of Historic Constructions, D’Ayala D. and Fodde E. Eds., Vol. 2, Bath, UK, pp. 1181-1187

Jalali, S.; Torgal., Eires, R. (2009): Construção em Terra, Tec Minho, Publidisa

Jaquin, P.A. (2008): Analysis of Historic Rammed Earth Construction. PhD Thesis. Durham Universit, United Kingdom.

Johannesson, B.; Utgenannt, P. (2001): Microstructural Changes caused by Carbonation of Cement Mortar. *Cement and Concrete Research* Vol. 31, pp. 925-931. (cita no livro “A cal na construção” (2009))

Jorne, F; Henriques, F.; Baltazar, L. (2015): Influence of superplasticizer, temperature, resting time and injection pressure on hydraulic lime grout injectability. Correlation analysis between fresh grout parameters and grout injectability, *Journal of Building Engineering* 4 pag.140–151, Elsevier

Keller, A. (1982.): “Fiber Reinforced Concrete,” Construction Specifier, Dec. pp. 44-55(citado em Soroushian, P *et al* (1992))

Lanas, J.; Bernal, J.; Bello, M.; Galindo, J (2004): Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. Cement and Concrete Research 34, pp. 2191-2201.

Luso, E. (2012): Analise Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção em Alvenaria antiga, tese de doutoramento, Universidade do Minho.

Luso, E.; Lourenço, P.B (2014): Formulação de Caldas à base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga, 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental Aveiro, 15-17 de out., 2014

Lourenço, P.B. (2015): Reabilitação de edifícios de alvenaria e adobe, Universidade do Minho

Mateus, J. (2002): Técnicas tradicionais de construção e alvenarias. Lisboa: Livros Horizonte, p,34

Mesbah H., Buyle-Bodin F. (1999): Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. Construction Building Materials

Melo, K., e Carneiro, A. (2010).: Effect of Metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete. Construction and Building Materials, 24(8), 1529-1535.

Miltiadou, A. (1990) : Contribution à l'étude des coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie, Phd Tesis, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris (citado em Luso (2012))

Minke, G. (2006): Building with earth. Design and technology of a sustainable architecture, Birkhauser, Basel, 2006 (download)

Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Bisbikou, K. (2000): “Investigation of the technology of historic mortars”, Journal of Cultural Heritage 1, pp 45-58.

Moropoulou, A.; Polikreti, K.; Bakolas, A.; Michailidis, P. (2003): “Correlation of physicochemical and mechanical properties of historical mortars and classification by multivariate statistics”, Cement and Concrete Research 33, pp 891-898

Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Anagnostopoulou, S. (2005): Composite materials in ancient structures, Cement and Concrete Composites 27, pp 295-300.

Morton, T., (2010): Earth Masonry: Design and Construction Guidelines. IHS BRE Press (download)

Müller, U.; Micoli, L.; Fontana, P. (2016): Developmente of a lime based grout for cracks repair in earthen construction, Consttuction Building Materials, Maio, pg. 323-332

Neville, A. (2011): Properties of Concrete, 5th edition, ISBN: 978-0-273-75580-7

Nunes, C.; Slíz'ková, S. (2016): Freezing and thawing resistance of aerial lime mortar with metakaolin and a traditional water-repellent admixture, Construction and Building Materials 114, pag.896–905

Orasutthikul, S.; Unno, D.; Yokota, H. (2017): Effectiveness of recycled nylon fiber from waste fishing net with respect to fiber reinforced mortar, Construction Building Materials, 594-602

Paillêre, A.; Ben Bassat, M.; Akman, S. (1992): Guide for use of admixtures in concrete, Materials and Structures, (25):49-56

Pavía, S.; Hanley, R (2010): Flexural bond strength of natural hydraulic lime mortar and clay brick, Materials and Structures 43:913 DOI 10.161.7/s11527-009-9555-2

Pereira, M.; Aguiar, J.; Camões, A.; Cruz, H. (2010): Caracterização de argamassas para assentamento de alvenaria de tijolo, 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, Lisboa, Portugal

Perret, S. (2002) : Rôle du degré de saturation des sables fins à moyens sur leur injectabilité par des coulis de ciment microfin, Thèse de Doctorat és Sciences appliquées, Spécialité : Génie civil, Université de Sherbrooke (Québec) Canada (citado em Luso (2012))

Perret, S.; Ballvy, Ca; Palardv, D.; Laporte, R. (2003): Formulation of high-performance cement grouts for the rehabilitation of heritage masonry strutures, Third International Conference on Crouting and Grout Treatment, New Orleans, Louisiana.

Philokyprou, M., (2015): The earliest use of mudbricks in Cyprus. Issues of Provenance and Use. National Technical University of Athens, Athens, pp. 39–52

Pinho, F.F.S (2001): Paredes de Edifícios Antigos em Portugal. Edição LNEC, Conservação e Reabilitação.

Pinho, F (2000): Principais Patologias em Paredes de Edifícios Antigos. REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. LNEC, Lisboa

Ramachandran, V., Paroli, R., Beaudoin, J., Delgado, A. (2002): Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials. Norwich, New York, U.S.A. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Noyes Publications.

Rago, F; Cincotto, M. (1999): Influência do tipo de cal hidratada na reologia das pastas. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, ISSN 0103 – 9830. (citado em “A cal na construção”

Rede Azul, Projeto. (2005). Estudo de Novas Tecnologias Aplicadas ao Restauro, Programa União Europeia – Educação e Cultura, Leonardo da Vinci, Tradução Departamento de Física da Universidade de Aveiro. (Consultado em inovadomus 2011)

Ribeiro, O. (1969): Geografia e Civilização. Temas Portugueses, Coleção Espaço e Sociedade, Livros Horizonte, Lisboa, Portugal.

Rodrigues, M. (1998): “A Construção Civil em Aveiro, 1860-1930: Notas para a sua Compreensão Histórica”. p. 303-342.

Rodrigues, P.; Henriques, F. (2006): Subprodutos industriais como componentes pozolânicos em argamassas de cal aérea, PATORREB 2006 - 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, FEUP, Porto, março, p. 295-305

Rogers, F.; Smalley, J, (1995): The Adobe Reaction and the Use of Loess Mud in Construction. Construction and Building Materials 40, pp. 137-138 (biblioteca)

Roselund N. (1990): Repair of cracked walls by injection of modified mud. In proceedings of the 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture: Adobe 90 Preprints, Las Cruces, New Mexico, pp. 336-341.

Ruano, A. (2009): O Sistema Construtivo Tradicional em Período de Transição de Linguagens de Arquitectura – o Movimento Moderno e o adobe, Tese no âmbito dos Estudos Avançados em Reabilitação do Património Edificado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto (citado em Inovadomus 2011)

Ruano, A.; Costa; A.; Varum, H, (2010): Evolução do sistema construtivo de adobe na Fábrica de Porcelanas da Vista Alegre (1937-1945). Conservar Património Conservar Património ARP Associação Profissional de Conservadores-Restauradores de Portugal

Silva, R.; Schueremans, L., Oliveira, D. (2009): Grouting as a repair/strengthening solution for earth constructions, ISISE - Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering

Silva, R (2013): Repair of Earth Constructions by Means of Grout Injection, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.

Silva, B.A.; Ferreira Pinto, A.P.; Gomes, A. (2015): Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works, Construction and Building Materials 94, pag.346–360

Silva, R.; Oliveira, D., Schueremans, L., Miranda, T., Machado, J. (2016): Effectiveness of the repair of unstabilised rammed earth with injection of mud grouts, ISISE - Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering, Universidade do Minho

Smith, M.; Collins, L.; (1993): Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes, Edited by Geological Society, England.

Spadea, S.; Farina, I.; Carrafiello, A.; Fraternali, F. (2015): Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement, Construction Building Materials 200-209

Soroushian, P.; Khan, A.; Hsu, J. (1992): Mechanical Properties of Concrete Materials Reinforced with Polypropylene or Polyethylene Fibers ACI Materials Journal, Nov.-Dec.

Tavares, A., Costa, A., Varum, H., (2011): Manual de Reabilitação e Manutenção de Edifícios - Guia de Intervenção. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. INOVADOMUS. Junho de 2011.

Tavares; A.; Costa, A.; Varum; H. (2012) a): Adobe and Modernism in Ílhavo, Portugal. Journal of Architectural Heritage. Editor Taylor & Francis, ISSN 1558-3058

Tavares, A., Costa, A., Varum, H, (2012) b): Common Pathologies in Composite Adobe and Reinforced Concrete Constructions. *Journal of performance of constructed facilities* © ASCE, July/August 2012

Tavares, A.; D'Ayala, D.; Costa, A.; Varum, H. (2014) a): Construction systems. Chapter 2. Structural Rehabilitation of old buildings. Building Pathology and Rehabilitation 2. Editor Springer-Verlag DOI: 10.1007/978-3-642-39686-1_1. Berlin, Heideberg (Citado em Edifícios de adobe. Manual de Manutenção (2014))

Tavares, A.; Costa, A.; Varum, H. (2014) b): Edifícios de adobe. Manual de Manutenção. Publindústria, Edições Técnicas 380387/14

Tavares, A.; Costa, A.; Varum, H. (2014) c): Timber structures of the roof of centenary earthen buildings. Case studies. Vernacular heritage and earthen architecture: Contributions for sustainable development – Correia, Carlos & Rocha (Eds). Taylor & Francis Group, London (Citado em Edifícios de adobe. Manual de Manutenção (2014)

Tavares, A.; Fernandes, M. (2016): O adobe. Cadernos de construção com Terra, Argumentum

Toledo, R.; Sanjuan, M (1999): Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. Cem Concr Res

Toumbakari, E.; Van Gemert, D.; Tassios, T.; Vintzileou, E. (2003): Effect of the Mechanical Properties of injection Grouts on the Structural Behaviour of Three Leaf Masonry Walls, North American Masonry Conference, Clemson, South Carolina, USA.

Valek, J. et al (2014): Determination of optimal burning temperature ranges for production of natural hydraulic limes, Construction and Building Materials, Volume 66, Pages 771-780

Valluzzi, M. (2000): “Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di calce”. Università di Padova, Italy,

Valluzzi, F; Modena, C. (2004): Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls, Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 37, pp 184-192

Van Rickstal, F. (2000): Grout Injection of masonry, scientific approach and modeling, Ph. D. Thesis, KU Leuven, Department of Civil Engineering.

Varum, H.; Costa, A.; Pereira, H; Almeida, J. (2006): Ensaios de caracterização do comportamento estrutural de construções existentes em adobe. V SIACOT: Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra / I SAACT: Seminario Argentino de Arquitectura y Construcción con Tierra

Varum, H.; Costa, A.; Velosa, A.; Martins, T.; Pereira, H.; Almeida, J. (2005): Caracterização mecânica e patológica das construções em Adobe no distrito de Aveiro como suporte em intervenções de reabilitação. Le case e le città della terra cruda

conservazione, significato e decoro urbano. Education and Culture Program: Culture 2000.

Varum, H.; Costa, A.; Pereira, H.; Almeida, J.; Rodrigues, H. (2008): Caracterização do comportamento estrutural de paredes de alvenaria de adobe. *Mecânica Experimental: revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de tensões*

Varum et al (2014): Structural Behaviour and Retrofitting of Adobe Masonry Building

Veiga, M.; Fernanda, R. (1994): “Argamassas de Revestimento na Reabilitação do Património Urbano”. 2.º ENCORE. Lisboa: junho/Julho de 1994. (citado em Pereira, M. *et al* (2010)]

Veiga, M. (1998): Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação, Dissertação de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Veiga, M. R (2003): as argamassas na conservação, 1ªs Jornadas na Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções existentes, Aveiro

Velosa, A.; Varum, H (2014): Adequacy of mortars for adobe building renders. *Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development* - Correia, Carlos & Rocha (Eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00083-4

Vintzileou, E. (2006): Grouting of Three-Leaf Stone Masonry: Types of Grouts, Mechanical Properties of Masonry before and after Grouting, *Strutural Analysis of Historical Constructions*, Lourenço P. B., Roca P., Modena C., Agrawal S. (eds), New Delhi.

Vintzileou, E.; Tassios, T. (1995): Three Leaf Stone Masonry Strengthened by Injecting Cement Grouts, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121 (5): 848-856.

Vintzileou, E; Miltiadou-Fezansb, A. (2008): Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts, *Engineering Structures* 30 2265–2276, Elsevier

Warren, J. (1999): “Conservation of Brick”, Cap. 12 – Mortars, Renderings and Plasters, Butterworth Heinemann, England. (books)

Wright, G., (1985): Ancient building in south Syria and Palestine. Handb. der Orient. / Hrsg. von B Spuler. 1, p. 539.

Young, J.; Mindess, S.; Gray, R.; Bentur, A. (1998): The Science and Technology of Civil Engineering Materials, Ed. Prentice Hall Inc., New Jersey.

Webgrafia:

<http://www.anyonegirl.com/mondays-muse-paradise-lost-persia-from-above>, Julho 2017

<http://o-meu-passaporte.blogspot.pt/2012/02/cidade-de-shibam-iemen-manhattan-do.html>

<http://originalmiles.com.br/lagoa-da-huacachina/> Julho 2017

www.google.pt/search?q=paredes+de+alvenaria&espv=2&biw=1517&bih=735&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjHnaQxcTQAhXCxxQKHVAkAOQQ_AUIBigB&dpr=0.9

novembro 2016

www.google.pt/masonrygroutinjection.com/grout-injection-technology, novembro 2016

<http://www.ecodesenvolvimento.org/posts/2013/junho/casas-de-taipa-voltam-a-moda-em-portugal> Julho 2017

<http://lecycpicorelli-bioarquitetura.blogspot.pt/2011/06/construcao-de-terra-parte2-adobe.html>

<http://arquitetesuasideias.com.br/2016/08/31/conheca-mais-sobre-a-arquitetura-vernacular-e-o-adobe/> Julho 2017

<http://mapio.net/pic/p-18861977/> em Novembro de 2017

<https://www.youtube.com/watch?v=VJTbaDls8CI>, Julho 2017

<http://reservanaturalvictoria.blogspot.pt/2010/04/construyendo-arcos-de-barro.html> Julho 2017

[https://ark.gamepedia.com/Adobe_Pillar_\(Scorched_Earth\)](https://ark.gamepedia.com/Adobe_Pillar_(Scorched_Earth)) Julho 2017

<https://www.pinterest.pt/pin/86975836525102362/> Julho 2017

https://www.researchgate.net/publication/292605925_Assessment_of_Seismic_Performance_of_Adobe_Structures_in_Pakistan_and_Portugal Julho 2017